

TESIS - TE142599

**ANALISIS APLIKASI CASCADED H-BRIDGE
MULTILEVEL INVERTER (CHB-MLI) PADA
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS)
YANG TERHUBUNG KE SISTEM DISTRIBUSI
TENAGA LISTRIK**

FIFI HESTY SHOLIAH
2212201010

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng.
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015

TESIS - TE142599

ANALYSIS OF THE APPLICATION CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL INVERTER (CHB-MLI) ON A SOLAR POWER PLANT CONNECTED TO ELECTRICAL POWER DISTRIBUTION SYSTEM

FIFI HESTY SHOLIAH
2212201010

ADVISOR
Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng.
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D

MAGISTER PROGRAM
POWER SYSTEM ENGINEERING
ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015

**Tesis ini disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
Di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**


**Oleh :
Fifi Hesty Sholihah
NRP. 2212201010**

**Tanggal Ujian : 9 Januari 2015
Periode Wisuda : Maret 2015**

Disetujui Oleh :


**1. Prof. Dr. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng.
NIP. 196510121990031003**

(Pembimbing 1)


**2. Heri Suryatmojo, ST., MT., Ph.D.
NIP. 198006032006041003**

(Pembimbing 2)


**3. Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.
NIP. 195512071980031004**

(Penguji)


**4. Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.
NIP. 196308171990031001**

(Penguji)


**5. Dr. Ardyono Priyadi, ST, M.Eng.
NIP. 197309271998031004**


(Penguji)


**6. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.
NIP. 197311192000031001**

(Penguji)



Direktur Program Pascasarjana


**Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT
NIP. 196404051990021001**

ANALISIS APLIKASI *CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL INVERTER* (CHB-MLI) PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) YANG TERHUBUNG KE SISTEM DISTRIBUSI TENAGA LISTRIK

Nama Mahasiswa : Fifi Hesty Sholihah

NRP : 2212 201010

Pembimbing : 1. Prof. Dr. Ir. M. Ashari, M.Eng.
2. Heri Suryoatmojo S.T., M.T., Ph.D

ABSTRAK

Peranan energi baru terbarukan dalam sasaran Kebijakan Energi Nasional 2025 sebesar 5% meliputi energi air, angin, matahari, biomassa, dan nuklir. Diantara sumber-sumber energi tersebut, energi matahari memiliki banyak keuntungan yaitu tidak akan pernah habis, tidak menghasilkan zat beracun, dan tidak merusak alam akibat instalasinya. Usaha yang paling signifikan dalam peningkatan penggunaan energi baru terbarukan adalah dengan membangun instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dalam skala besar dan terhubung ke sistem jejaring listrik (*grid*). Pada penelitian dirancang PLTS berkapasitas 100 kW terhubung ke sistem distribusi 20 kV melalui *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter* (CHB-MLI). Multilevel inverter jenis CHB-MLI membutuhkan sumber-sumber searah atau *Direct Current* (DC) terpisah untuk tiap-tiap *H-bridge inverter*. Penyediaan sumber-sumber DC dari PLTS dengan konfigurasi sel surya yang terpusat yang dipisah dengan menggunakan transformator multibelitan untuk selanjutnya disearahkan menggunakan *rectifier*. Sistem dilengkapi dengan *Maximum Power Point Tracker* (MPPT) untuk menghasilkan daya maksimum pada nilai radiasi dan temperatur yang berbeda-beda. Hasil simulasi menunjukkan CHB-MLI mampu mentransfer daya dari PV ke grid sebesar 95,5 kW dengan efisiensi *tracking* sebesar 93,6%. CHB-MLI memiliki kandungan harmonik tegangan sebesar 0,046%.

Kata kunci: PLTS, CHB-MLI, MPPT, grid

ANALYSIS OF THE APPLICATION CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL INVERTER (CHB-MLI) ON A SOLAR POWER PLANT CONNECTED TO ELECTRICAL POWER DISTRIBUTION SYSTEM

Student Name : Fifi Hesty Sholihah
NRP : 2212 201010
Advisor : 1. Prof. Dr. Ir. M. Ashari, M.Eng.
2. Heri Suryatmojo S.T., M.T., Ph.D

ABSTRACT

The role of renewable energy in the National Energy Policy 2025 is 5% include water, wind, solar, biomass, and nuclear energy. Among these energy sources, solar energy has many advantages that will never run out, does not produce toxic, and does not damage the nature due to its installation. The most significant effort to increase the use of renewable energy is installing of Solar Power Plant (SPP) in a large scale and connecting to the electrical network system (grid). In this study, it has been designed a 100 kW SPP connected to the 20 kV distribution system through Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter (CHB-MLI). Multilevel inverter type CHB-MLI require Separated Direct Current (DC) sources (SDCS) for each H-bridge inverter. SDCS are provided by centralized solar power plant which is separated by multi-winding transformer to rectified using rectifier. Maximum Power Point Tracker (MPPT) is require to produce maximum power at varying radiations and temperatures. The simulation results show the CHB-MLI is capable of transferring power from the PV to the grid 95,5 kW with a tracking efficiency 93,6%. Total harmonics distortion of CHB-MLI voltage is 0.046%.

Keywords: SPP, CHB-MLI, MPPT, grid

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini dengan judul :

Analisis Aplikasi Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter (CHB-MLI) Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang Terhubung ke Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Tesis ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada bidang keahlian Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Dalam penyusunan tesis dan selama studi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, penulis mendapatkan bantuan, bimbingan dan dukungan tak ternilai, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar besarnya kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan ridho dan berkah-Nya sehingga tesis ini dapat terselesaikan.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Mochammad Ashari M.Eng dan Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D., selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran, bimbingan, dan perhatian kepada penulis selama proses pengerjaan tesis ini.
3. Seluruh Dosen Bidang Sistem Tenaga Jurusan Teknik Elektro ITS yang telah memberikan bimbingan dan pengajaran.
4. Institusi PENS yang telah mengizinkan dan mendukung untuk melanjutkan jenjang pendidikan S2 di Jurusan Teknik Elektro ITS.
5. Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi dan Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) yang telah memberikan beasiswa sehingga penulis mampu menyelesaikan tesis

Secara khusus, dengan tulus dari lubuk hati sanubari terdalam penulis menyampaikan terima kasih beriring doa kepada :

1. Kedua orang tua tercinta Ibunda Sugihartin dan Ayahanda Moch. Soelehan yang tidak pernah berhenti mendidik, memberi dukungan material dan moral berupa doa dan ridha untuk putrinya.
2. Suami tercinta Aditya Bimantara yang selalu memberi doa dan dukungan dalam proses pengerjaan tesis
3. Seluruh saudara dan keluarga yang tidak dapat disebut satu persatu atas segala dukungan yang diberikan.
4. Anggota Laboratorium PSOC. Terima kasih atas kerja sama yang telah diberikan.
5. Semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan tesis yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Besar harapan penulis agar tesis ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi pembaca. Penulis menyadari tesis ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik. Terima kasih.

Surabaya, Januari 2015

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN

JUDUL

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK i

KATA PENGANTAR..... ii

DAFTAR ISI iv

DAFTAR GAMBAR v

DAFTAR TABEL vii

NOMENKLATUR vi

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang 1

1.2 Perumusan Masalah 2

1.3 Batasan Masalah 3

1.4 Tujuan Penelitian 3

1.5 Kontribusi Penelitian..... 3

BAB 2 APLIKASI CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL INVERTER

PADA PLTS

2.1 Sel Surya 5

2.2 *Maximum Power Point Tracker (MPPT)* 8

2.3 Konfigurasi Seri-Paralel PV 10

2.4 Inverter Satu Fasa 11

2.5 Penyearah Tidak Terkontrol 12

2.6 Multilevel Inverter 14

2.7 Level Shifted Carrier PWM 17

BAB 3 DESAIN APLIKASI CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL INVERTER PADA PLTS

3.1	Konfigurasi Sistem	19
3.2	Konfigurasi PV Berkapasitas 100 kW	20
3.3	<i>Maximum Power Point Tracker (MPPT)</i>	22
3.4	Desain Inverter Satu Fasa	24
3.5	<i>Cascaded H-bridge Multilevel Inverter (CHB-MLI)</i>	25

BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

4.1	Perbandingan Antara <i>Plant</i> dengan MPPT dan <i>Plant</i> Tanpa MPPT....	33
4.2	Pengujian Sistem dengan Variasi Radiasi	35
4.3	Pengujian dengan Variasi Temperatur	37
4.4	Analisis Harmonika	37

BAB 5 PENUTUP

5.1	Kesimpulan	41
5.2	Saran	41

DAFTAR PUSTAKA

INDEKS

LAMPIRAN

RIWAYAT PENULIS

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR	NAMA GAMBAR	HALAMAN
Gambar 1.1	Target Bauran Energi Nasional.....	1
Gambar 2.1	Rangkaian Ekuivalen Sederhana <i>Photovoltaic</i> (PV).....	5
Gambar 2.2	Rangkaian Ekuivalen <i>Photovoltaic</i> (PV)	6
Gambar 2.3	Kurva Karakteristik I-V dan P-V	7
Gambar 2.4	Kurva Karakteristik I-V dengan Variasi Irradiasi dan Suhu	8
Gambar 2.5	MPP pada Kurva Karakteristik I-V dengan Variasi Irradiasi	9
Gambar 2.6	MPP <i>Tracking</i>	10
Gambar 2.7	Konfigurasi Seri-Paralel PV	10
Gambar 2.8	Kurva I-V: (a) Konfigurasi Seri dan (b) Konfigurasi Paralel ...	10
Gambar 2.9	Rangkaian Inverter Satu fasa	11
Gambar 2.10	(a) S_1 & S_3 on; (b) S_2 & S_4 on; (c) S_1 & S_2 on; (d) S_4 & S_3 on	12
Gambar 2.11	Rangkaian Penyearah	13
Gambar 2.12	Konfigurasi Rangkaian Multilevel Inverter CHB	15
Gambar 2.13	Gelombang Tegangan Output untuk 11-level Inverter CHB	16
Gambar 3.1	Konfigurasi Sistem pada Penelitian Sebelumnya	19
Gambar 3.2	Konfigurasi Sistem Keseluruhan yang Diusulkan	20
Gambar 3.3	Grafik Karakteristik P-V 100 KW	21
Gambar 3.4	Blok Diagram Instalasi Kontroler MPPT.....	22
Gambar 3.5	Blok Diagram Proses MPPT	22
Gambar 3.6	Variasi Nilai Radiasi	22
Gambar 3.7	Perbandingan daya output dengan variasi nilai radiasi	23
Gambar 3.8	Variasi Nilai Temperatur.....	23
Gambar 3.9	Perbandingan daya output dengan variasi temperatur	24
Gambar 3.10	Rangkaian Inverter Satu Fasa.....	24
Gambar 3.11	Blok Diagram Teknik Modulasi Inverter	25
Gambar 3.12	Transformator Multibelitan	26
Gambar 3.13	Blok Diagram Instalasi Rectifier	27
Gambar 3.14	(a) Rangkaian CHB-MLI; (b) Tegangan CHB-MLI 9 level	28

Gambar 3.15	Blok Diagram Kontrol CHB-MLI	29
Gambar 3.16	Teknik <i>Switching</i> LSC-PWM	29
Gambar 3.17	(a) Tegangan Output CHB-MLI (fasa); (b) Konfigurasi CHB-MLI fasa A	30
Gambar 3.18	Perbandingan Sinyal Modulasi dan Sinyal <i>Carrier</i> Untuk <i>H-Bridge</i> Pertama	31
Gambar 4.1	Daya Output PV dan CHB-MLI dengan MPPT.....	34
Gambar 4.2	Tegangan Output CHB-MLI	34
Gambar 4.3	Tegangan Output Grid.....	35
Gambar 4.4	(a)Variasi Radiasi 1000 W/m^2 dan 500 W/m^2	35
Gambar 4.5	Daya Output CHB-MLI dengan variasi radiasi.....	36
Gambar 4.6	(a) Arus Output Inverter; (b) Tegangan Output Inverter (fasa).	38
Gambar 4.7	Spektrum Harmonisa Tegangan	38
Gambar 4.8	Gelombang tegangan yang diukur sebelum filter.....	39
Gambar 4.9	(a) Arus Output CHB-MLI; (b) Arus Grid	39
Gambar 4.10	Spektrum Harmonisa Arus Output CHB-MLI	40

DAFTAR TABEL

TABEL	NAMA TABEL	HALAMAN
Tabel 2.1	Urutan Pensaklaran Inverter	12
Tabel 3.1	Spesifikasi PV pada <i>Standart Test Condition</i> (STC)	21
Tabel 3.2	<i>State</i> Pensaklaran <i>H-Bridge</i> Pertama	30
Tabel 3.3	Rating Spesifikasi Sistem	32
Tabel 4.1	Nilai Daya Output tanpa MPPT	33
Tabel 4.2	Nilai Daya Output	36
Tabel 4.3	Hasil Pengujian dengan 5 Nilai Radiasi	36
Tabel 4.4	Hasil Pengujian dengan Variasi Nilai Temperatur	37

NOMENKLATUR

I	Arus terminal PV, satuan Ampere (A)
I_{sc}	Arus yang terbangkit pada PV, satuan Ampere (A)
I_d	Arus dioda, satuan Ampere (A)
I_o	Arus saturasi dioda, satuan Ampere (A)
V	Tegangan terminal/output PV, satuan Volt (V)
q	Muatan elektron = $1,602 \times 10^{-19}$ satuan, Cuolomb (C)
k	Konstanta Boltzmann = $1,381 \times 10^{-23}$ (J/K).
T	Temperatur, satuan Kelvin (K)
R_p	Resistansi paralel, satuan Ohm (Ω)
R_s	Resistansi seri, satuan Ohm (Ω)
N_{ser}	Jumlah PV yang tersusun seri
N_{par}	Jumlah PV yang tersusun paralel
V_t	Tegangan terminal konfigurasi PV, satuan Volt (V)
a	Konstanta dioda ideal
I_{pv}	Arus output konfigurasi PV, satuan Ampere (A)
S	Radiasi, satuan Watt/meter ² (W/m ²)
S	Radiasi nominal, satuan Watt/meter ² (W/m ²)
E_g	<i>Band gap energy</i> , satuan elektron volt (eV)
V_{oc}	Tegangan open circuit, satuan Volt (V)
I_{sc}	Arus short circuit, satuan Ampere (A)
V_{mpp}	Tegangan maksimal, satuan Volt (V)
I_{mpp}	Arus maksimal, satuan Ampere (A)
T_{cell}	Temperatur <i>cell</i> PV, satuan Celcius (°C)
T_{amb}	Temperatur <i>ambient</i> , satuan Celcius (°C)
ΔP	Perubahan daya, satuan Watt (W)
V_{ref}	Amplitudo tegangan referensi sinus, satuan Volt (V)
V_{tri}	Amplitudo tegangan <i>carrier</i> segitiga, satuan Volt (V)
f_{sw}	Frekuensi <i>switching</i> , satuan Hertz (Hz)
f_{ref}	Frekuensi output inverter, satuan Hertz (Hz)

m_a	Indeks modulasi tegangan.
m_f	Indeks modulasi frekuensi
V_{out}	Tegangan output inverter satu fasa, satuan Volt (V)
V_{dc}	Tegangan input DC, satuan Volt (V)
$S_1, S_2,$ S_3, S_4	Switch
$D_1, D_2,$ D_3, D_4	Dioda
V_{rect}	Tegangan output penyearah, satuan Volt (V)
I_{rect}	Arus output penyearah, satuan Ampere (A)
V_m	Tegangan input maksimal penyearah, satuan Volt (V)
R	Beban penyearah, satuan ohm (Ω)
I_{rms}	Arus <i>root mean square</i> output penyearah, satuan Ampere (A)
m	Jumlah level tegangan output
k	Jumlah SDCS
n	Orde harmonika
M_i	Indeks modulasi tegangan pada multilevel inverter
h	Urutan harmonika
kW	Kilo Watt
MW	Mega Watt
kV	Kilo Volt
P_{max}	Daya maksimal PV, satuan Watt peak (Wp)
PI	Propotional Integral Controller
V_{pv}	Tegangan output PV, satuan Volt (V)
dP/dt	Perubahan daya terhadap waktu
dV/dt	Perubahan tegangan terhadap waktu
XOR	Logika XOR (extra OR)
INC	Increment (penambahan)
DEC	Decrement (pengurangan)
NOT	Logika NOT

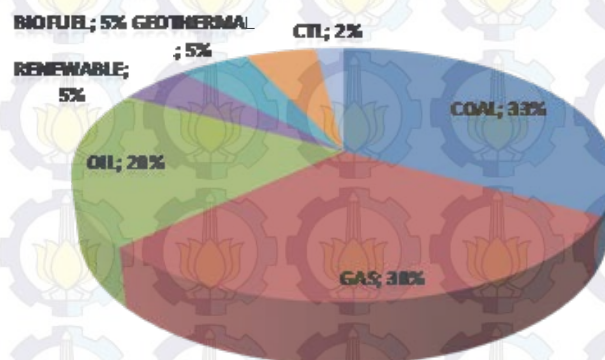
BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Visi sektor ketenagalistrikan adalah dapat melistriki seluruh rumah tangga, desa serta memenuhi kebutuhan industri yang berkembang cepat dalam jumlah yang cukup, transparan, efisien, andal, aman, dan ramah lingkungan untuk mendukung pertumbuhan perekonomian nasional dan meningkatkan kesejahteraan rakyat. Visi tersebut mampu dicapai dengan melakukan pembangkitan tenaga listrik dalam skala besar untuk masyarakat perkotaan atau daerah yang tingkat kepadatannya tinggi, pemberian prioritas kepada pembangkit tenaga listrik dari energi baru terbarukan untuk kelistrikan desa dan daerah terpencil, pemeliharaan keselamatan ketenagalistrikan dan kelestarian fungsi lingkungan, dan pemanfaatan tenaga kerja, barang, dan jasa produksi dalam negeri sebesar mungkin [1].

Visi dan misi sektor ketenagalistrikan mampu dicapai dengan menggunakan kebijakan dalam penggunaan energi nasional. Indonesia telah menetapkan sasaran Kebijakan Energi Nasional (KEN) 2025 sesuai peraturan presiden nomor 5 tahun 2006 tentang target bauran energi nasional yang harus dicapai sampai pada tahun 2025 yaitu batu bara (*coal*) 33%, gas 30%, minyak (*oil*) 20%, *biofuel* 5%, panas bumi (*geothermal*) 5%, energi baru terbarukan (*renewable energy*) 5%, dan *coal to liquids* (CTL) 2% [2]. Gambar 1.1 menyajikan peranan dari setiap sektor energi.



Gambar 1.1 Target bauran energi nasional

Peranan energi baru terbarukan dalam sasaran KEN 2025 sebesar 5% meliputi energi air, angin, matahari, biomassa, dan nuklir. Diantara sumber-sumber energi baru terbarukan tersebut, energi matahari memiliki lebih banyak keuntungan yaitu tidak akan pernah habis, tidak menghasilkan zat beracun yang dapat meracuni air, udara atau tanah, dan tidak merusak alam akibat instalasinya. Keuntungan-keuntungan tersebut membuat perkembangan pemanfaatan energi matahari menjadi kian pesat. Menurut data kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada tahun 2007 penggunaan energi matahari sebagai pembangkit listrik atau disebut dengan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebesar 12 MW, pada tahun 2012 meningkat hampir dua kali lipat yaitu 22,45 MW, pada tahun 2013 penggunaan energi matahari direncanakan sebesar 50 MW, dan pada tahun 2020 penggunaan energi matahari direncanakan sebesar 80 MW untuk mencapai target bauran energi nasional [3]. Untuk mencapai target yang signifikan dalam pengembangan PLTS maka cara yang paling efektif adalah membangun PLTS dalam skala besar dan terkoneksi ke sistem jaring tenaga listrik (*grid*).

Syarat agar PLTS dapat dikoneksikan ke *grid* adalah tegangan dan frekuensi output PLTS harus stabil. Tegangan dan frekuensi output PLTS dijaga stabil dengan menggunakan *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter* (CHB-MLI).

1.2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Melakukan konfigurasi panel surya berkapasitas 100 kW.
2. Melakukan perancangan inverter satu fasa untuk mencapai daya output yang maksimal pada panel surya dengan menggunakan MPPT (*Maximum Power Point Tracker*).
3. Merancang *Direct Current* (DC) *link* sebagai penyedia sumber-sumber DC yang terpisah untuk CHB-MLI.
4. Melakukan perancangan CHB-MLI yang memiliki karakteristik tegangan dan frekuensi output yang stabil.

1.3. Batasan Masalah

Untuk memudahkan penelitian dan mendapatkan hasil yang baik maka dalam penelitian ini ditetapkan beberapa batasan masalah sebagai berikut:

1. Pada penelitian ini tidak membahas efek *shading* pada PV
2. Komponen pada sistem memiliki karakteristik yang ideal
3. Trafo pada sisi *grid* hanya digunakan untuk menaikkan tegangan ke 20 kV, sedangkan trafo disisi PV digunakan sebagai pemisah.

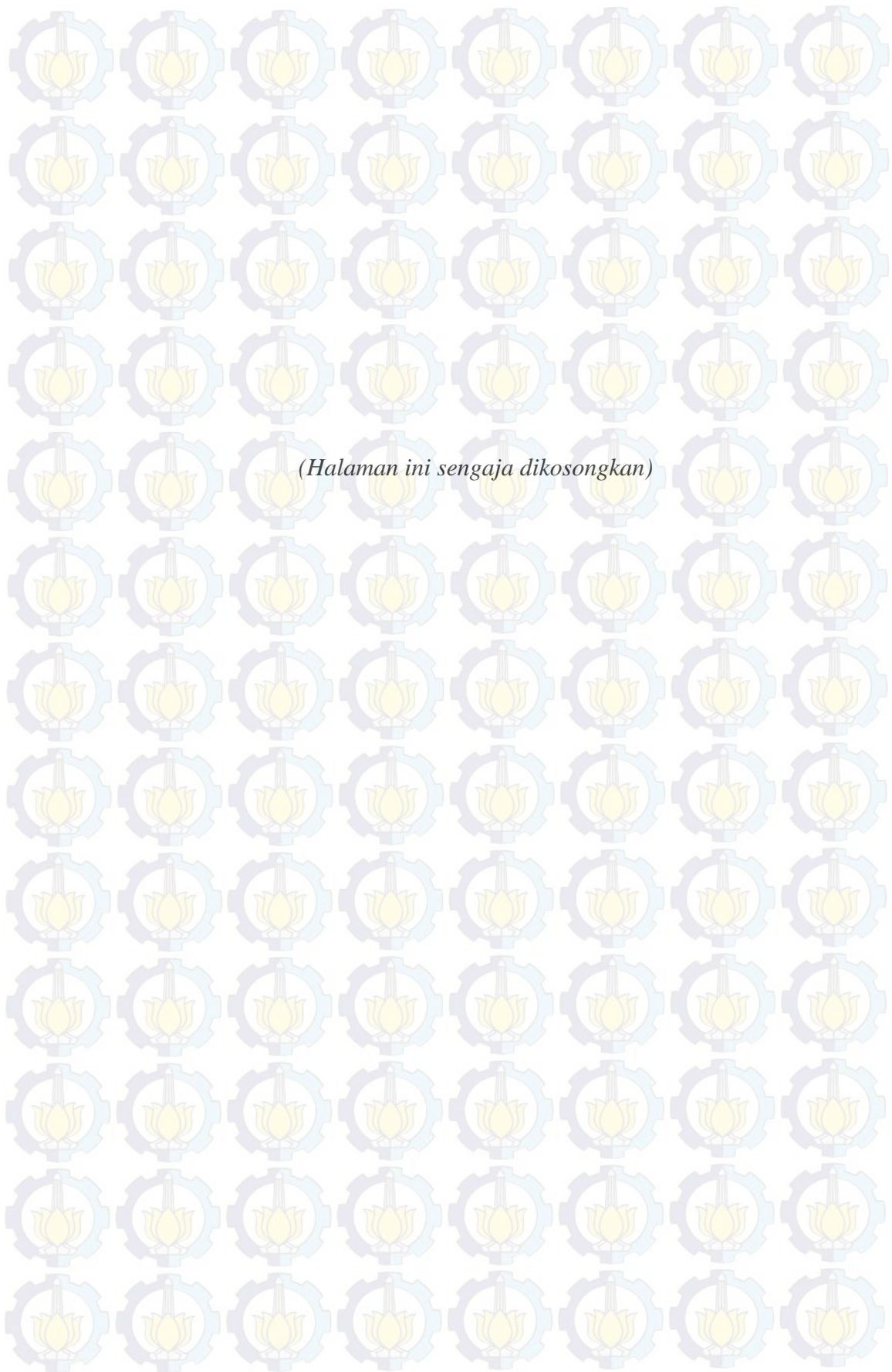
1.4. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengaplikasikan CHB-MLI pada PLTS terpusat (tidak dikonfigurasi dalam PV *array*) yang terhubung ke saluran distribusi.

1.5. Kontribusi Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi sebagai berikut :

1. Sumber DC untuk CHB-MLI pada penelitian ini disediakan dari *single DC bus* kemudian dipisahkan menggunakan trafo.
2. Penelitian ini dapat menjadi referensi untuk pengembangan pembangkit energi baru terbarukan terhubung ke *grid*



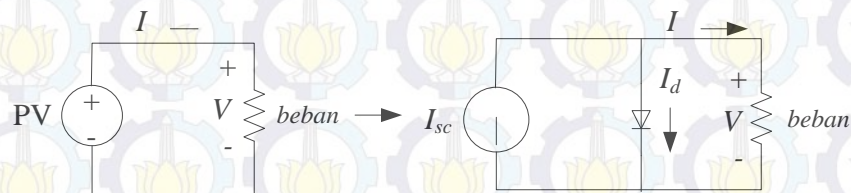
(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB 2

APLIKASI *CASCADED H-BRIDGE MULTILEVEL INVERTER* PADA PLTS

2.1. Sel Surya

Sel surya dimodelkan dalam rangkaian ekivalen yang sederhana terdiri dari dioda diparalel dengan sumber arus ideal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1. Sumber arus ideal memberikan arus yang berbanding lurus dengan radiasi sinar matahari yang diterima oleh sel [4].



Gambar 2.1 Rangkaian ekivalen sederhana *photovoltaic* (PV)

Dari rangkaian ekivalen di atas dapat dituliskan persamaan arus sebagai berikut :

$$I = I_{sc} - I_o \left[e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right] \quad (2-1)$$

Untuk $I_d = I_o \left[e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right]$ adalah persamaan dioda ideal yang

didiskripsikan dari kurva karakteristik V-I dioda p-n *junction*.

I adalah arus output PV (A).

I_{sc} adalah arus yang terbangkit pada PV (A).

I_d adalah arus dioda (A).

I_o adalah arus saturasi dioda (A).

V adalah tegangan terminal/output PV (V).

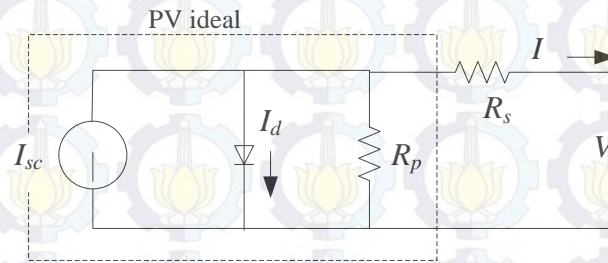
q adalah muatan elektron = $1,602 \times 10^{-19}$ (C).

k adalah konstanta Boltzmann = $1,381 \times 10^{-23}$ (J/K).

T adalah temperatur sel (K).

Rangkaian ekivalen pada Gambar 2.1 terlalu sederhana jika diaplikasikan untuk memperoleh karakteristik yang mendekati *real*. Oleh karena itu perlu ditambahkan beberapa parameter untuk merepresentasikan kondisi *real* PV yaitu penambahan resistansi paralel jika PV berbayang. Rangkaian ekivalen PV yang lebih kompleks ditunjukkan pada Gambar 2.2 dengan menambahkan resistansi seri (R_s) dan resistansi paralel (R_p) [4]. Pada penelitian ini digunakan rangkaian ekivalen PV seperti pada Gambar 2.2.

$$I = I_{sc} - I_o \left\{ e^{\left[\frac{q(V + I R_s)}{k T} \right]} - 1 \right\} - \left(\frac{V + I R_s}{R_p} \right) \quad (2-2)$$



Gambar 2.2 Rangkaian ekivalen *photovoltaic* (PV)

Persamaan di atas dapat ditulis sebagai berikut dengan jumlah PV yang dihubungkan seri sebanyak N_{ser} .

$$I = I_{pv} - I_o \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t a} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2-3)$$

Untuk $V_t = N_{ser} k T / q$

Arus output yang dihasilkan PV bergantung secara linier terhadap radiasi dan temperatur berdasarkan persamaan di bawah ini :

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + k_1 \Delta_T) \frac{S}{S_n} \quad (2-4)$$

S_n adalah radiasi nominal.

Arus saturasi diode I_o yang bergantung pada nilai temperatur diekspresikan ke dalam persamaan berikut

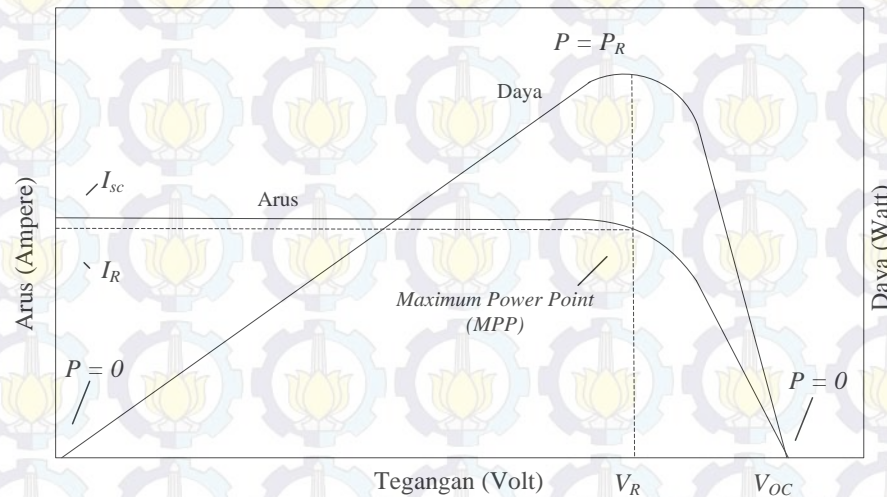
$$I_o = I_{o,n} \left(\frac{T_n}{T} \right)^3 \exp \left[\frac{q E_g}{a k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (2-5)$$

T_n adalah temperatur nominal dan E_g adalah *band gap energy* ($E_g \approx 1,12$ eV).

Menurut persamaan (2-3), untuk modul *array* PV identik dengan $N_{ser} \times N_{par}$, arus output dapat dihitung menggunakan rumus berikut :

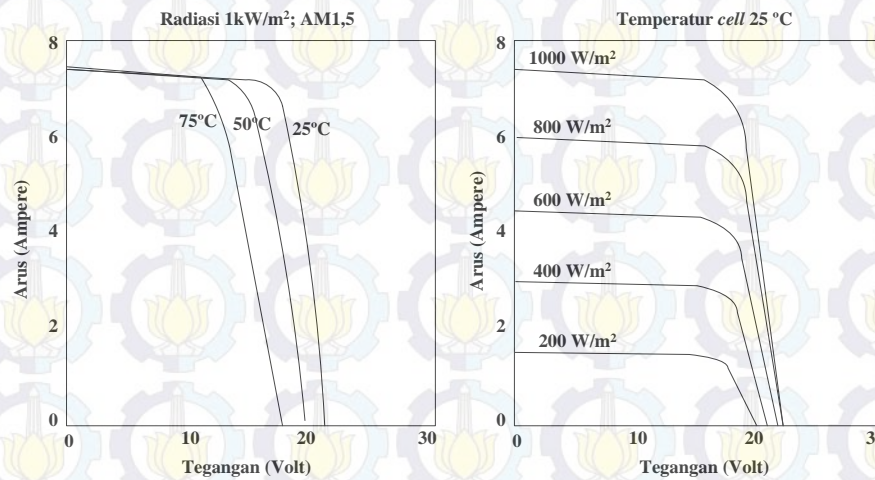
$$I = I_{pv}N_{par} - I_oN_{par} \left[\exp \left(\frac{V + R_s \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}} \right) I}{V_t a N_{ser}} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}} \right) I}{R_p \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}} \right)} \quad (2-6)$$

Sebelum beban dihubungkan ke PV atau ketika PV dalam keadaan *open circuit*, tegangan PV berada pada nilai maksimalnya yaitu tegangan *open circuit* (V_{oc}) sehingga arus tidak mengalir. Jika PV dihubung singkat pada terminal outputnya maka I_{sc} akan mengalir dan tegangan akan sama dengan nol. Pada kedua kondisi ini tidak ada daya yang dibangkitkan. Gambar 2.3 merupakan kurva karakteristik I-V dan P-V untuk modul PV [4]. *Maximum power point* (MPP) terjadi pada lekukan kurva I-V pada titik ini arus dan tegangan PV berada pada nilai maksimal. Pada titik MPP ini, tegangan PV disebut dengan tegangan maksimal (V_{mpp}) dan arus PV disebut dengan arus maksimal (I_{mpp}).



Gambar 2.3 Kurva karakteristik I-V dan P-V

Nilai daya output PV bergantung pada radiasi (S) dan temperatur sekitar (T) [4]. Gambar 2.4 menunjukkan kurva karakteristik I-V dengan perubahan intensitas cahaya matahari dan suhu.



Gambar 2.4 Kurva karakteristik I-V dengan variasi radiasi dan suhu

Perubahan radiasi sangat berpengaruh pada nilai arus (I_{sc}) PV. Nilai arus (I_{sc}) PV menjadi sangat rendah apabila radiasi turun. Pada Gambar di atas terlihat juga bahwa ketika radiasi berkurang 50%, arus (I_{sc}) PV juga berkurang 50%. Sedangkan perubahan radiasi tidak begitu berpengaruh terhadap tegangan (V_{oc}) PV. Perubahan tegangan (V_{oc}) PV terlihat jelas ketika suhu mengalami perubahan namun tidak begitu berpengaruh pada arus (I_{sc}) PV.

Pada *datasheet* PV menyediakan kurva karakteristik dan parameter-parameter berdasarkan dua macam pengujian yaitu *Standart Test Condition* (STC) dan *Nominal Operating Cell Temperature* (NOCT). Pengujian PV standart atau STC adalah pengujian PV pada radiasi 1000 W/m^2 , *air mass ratio* (AM) 1,5, dan temperatur *cell* 25°C . Sedangkan NOCT adalah pengujian PV pada radiasi $0,8 \text{ kW/m}^2$. Temperatur *cell* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini

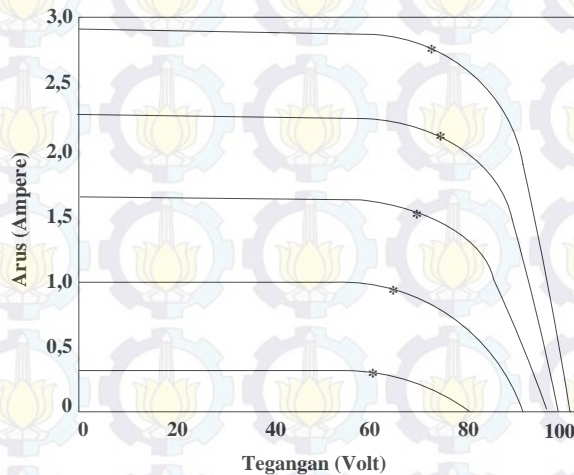
$$T_{cell} = T_{amb} + \left(\frac{NOCT - 20^\circ}{0,8} \right) \cdot S \quad (2-7)$$

T_{cell} adalah temperatur *cell* ($^\circ\text{C}$), T_{amb} adalah temperatur *ambient* ($^\circ\text{C}$), dan S adalah radiasi (kW/m^2).

2.2. Maximum Power Point Tracker (MPPT)

Setiap titik pada kurva karakteristik I-V memiliki nilai tegangan dan arus tertentu. Untuk kurva karakteristik I-V tertentu hanya terdapat satu titik yang

sesuai dengan daya maksimal. Titik ini disebut dengan *Maximum Power Point* (MPP). Pada Gambar 2.5 ditunjukkan MPP pada masing-masing kurva dengan level radiasi yang bervariasi [4]. MPP terjadi pada lekukan kurva I-V, pada titik ini baik arus maupun tegangan PV berada pada nilai maksimal. Pada titik MPP ini, tegangan PV disebut dengan tegangan maksimal (V_{mpp}) dan arus PV disebut dengan arus maksimal (I_{mpp}).

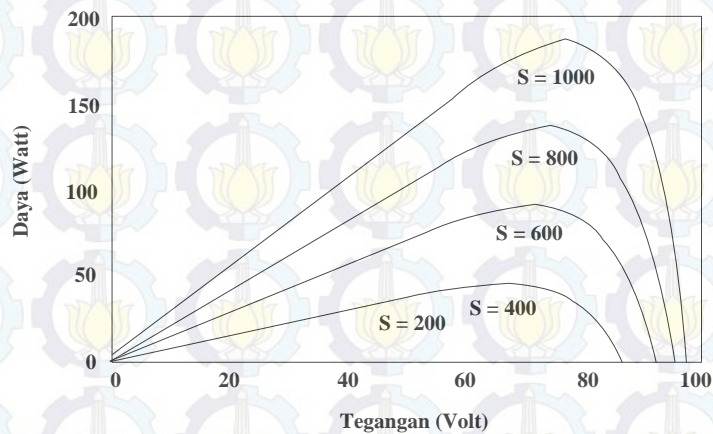


Gambar 2.5 MPP pada kurva karakteristik I-V dengan variasi radiasi

Menggunakan panel surya atau PV *array* tanpa MPPT akan sering mengakibatkan daya terbuang sehingga mengharuskan untuk menginstal panel tambahan untuk kebutuhan daya yang sama.

Beberapa algoritma MPPT yaitu *Perturb & Observe* (P&O), *Incremental Conductance* (IC), dan *Parasitic Capacitance* (PC) banyak didiskusikan untuk memperoleh nilai MPP. Diantara algoritma MPPT tersebut, P&O merupakan algoritma yang paling sederhana dan banyak digunakan baik dalam penelitian maupun komersial.

Asumsikan *array* PV beroperasi pada titik A pada Gambar 2.6 yang jauh dari MPP. Jika ΔP dan ΔV positif, maka tegangan PV naik. Jika ΔP positif dan ΔV negatif, maka tegangan PV turun. Jika ΔP negatif dan ΔV positif, maka tegangan PV turun. Jika ΔP dan negatif, maka tegangan PV naik [4].

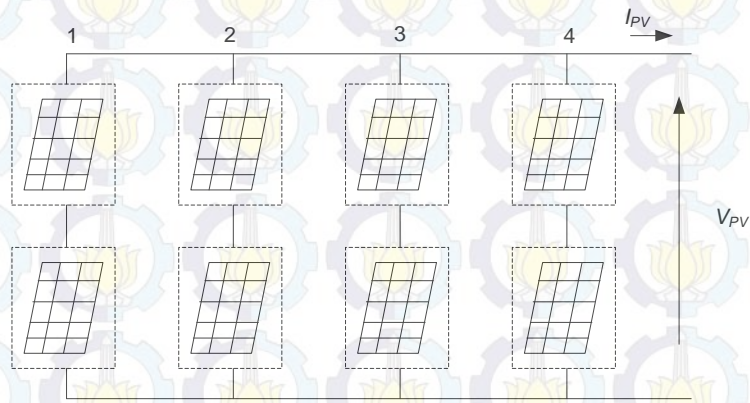


Gambar 2.6 MPP Tracking

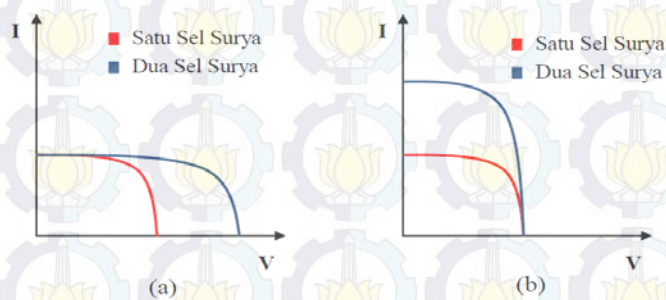
($S = \text{radiasi Watt/m}^2$)

2.3. Konfigurasi Seri-Paralel PV

Konfigurasi seri-paralel bertujuan untuk menentukan nilai tegangan dan arus PV agar diperoleh daya yang diinginkan. Ilustrasi konfigurasi seri-paralel beberapa PV ditunjukkan pada Gambar 2.7. Kurva karakteristik I-V akibat konfigurasi seri dan paralel ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.7 Konfigurasi seri-paralel PV



Gambar 2.8 Kurva I-V : (a) Konfigurasi Seri dan (b) Konfigurasi Paralel

Berdasarkan kurva I-V pada Gambar 2.8, dapat diketahui bahwa konfigurasi seri pada PV dapat meningkatkan tegangan, sedangkan konfigurasi paralel dapat meningkatkan arus. Jika dilakukan konfigurasi seri-paralel pada PV akan meningkatkan daya karena arus dan tegangan akan meningkat [4].

2.4. Inverter Satu Fasa

Inverter adalah suatu rangkaian yang mengubah besaran DC menjadi AC dengan amplitudo dan frekuensi tegangan dapat diatur. Pengaturan amplitudo tegangan dan frekuensi output inverter dilakukan dengan menentukan indeks modulasi tegangan dan frekuensi sesuai persamaan berikut.

$$m_a = \frac{V_{ref}}{V_{triangle}} \quad m_f = \frac{f_{sw}}{f_{ref}} \quad (2-8)$$

V_{ref} adalah amplitudo tegangan referensi sinus (V).

V_{tri} adalah amplitudo tegangan *carrier* segitiga (V).

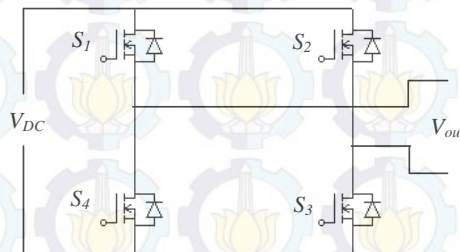
f_{sw} adalah frekuensi *switching* (Hz).

f_{ref} adalah frekuensi output inverter (Hz).

m_a adalah indeks modulasi tegangan.

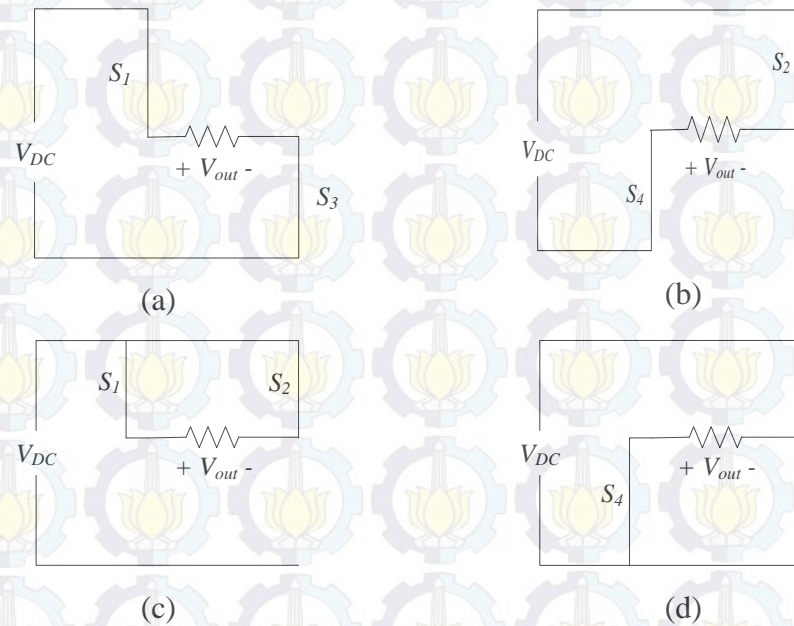
m_f adalah indeks modulasi frekuensi

Pada penelitian ini, inverter digunakan untuk mengubah besaran DC dari PV menjadi besaran AC yang akan dihubungkan ke transformator multi belitan. Karena inverter terhubung langsung dengan PV, maka MPPT diaplikasikan pada inverter.



Gambar 2.9 Rangkaian inverter satu fasa

Rangkaian inverter satu fasa ditunjukkan pada Gambar 2.9, dikenal juga dengan *full-bridge inverter* atau *H-Bridge inverter*. Tegangan output V_{out} dapat bernilai $+V_{dc}$, $-V_{dc}$, atau nol tergantung pada konduksi masing-masing *switch* (S_1 , S_2 , S_3 , S_4). Gambar 2.10 menunjukkan rangkaian ekuivalen untuk kombinasi konduksi *switch*. Tegangan output yang dihasilkan dari kombinasi *switch* tersebut ditunjukkan pada tabel 2.1.



Gambar 2.10 (a) S_1 & S_3 on; (b) S_2 & S_4 on; (c) S_1 & S_2 on; (d) S_4 & S_3 on

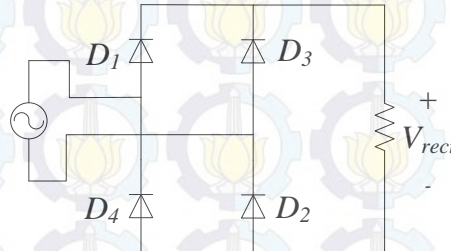
Tabel 2.1 Urutan pensaklaran Inverter

Konduksi Saklar	Tegangan Output
S_1 dan S_3	$+V_{dc}$
S_2 dan S_4	$-V_{dc}$
S_1 dan S_2	0
S_4 dan S_3	0

2.5. Penyearah Tidak Terkontrol

Output dari inverter satu fasa dihubungkan ke transformator multi belitan dengan jumlah belitan pada sisi sekunder sesuai dengan level tegangan output multilevel inverter yang diinginkan. Sisi sekunder transformator dihubungkan ke penyearah tidak terkontrol untuk menyediakan sumber DC terpisah.

Penyearah tidak terkontrol menggunakan komponen dioda. Penyearah satu fasa tidak terkontrol ditunjukkan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Rangkaian Penyearah

Dioda D_1 dan D_2 bekerja secara bersamaan, dioda D_3 dan D_4 juga bekerja secara bersamaan. Dioda D_1 dan D_3 tidak dapat bekerja bersamaan, dioda D_2 dan D_4 juga tidak dapat bekerja bersamaan. Hal tersebut terjadi karena dioda hanya mengalirkan arus dalam satu arah saja dari anoda ke katoda. Arus output yang dihasilkan bisa bernilai positif atau nol.

Tegangan pada beban resistif yang ditunjukkan pada Gambar 2.11 dapat dituliskan dalam persamaan (2-9)

$$V_{rect}(\omega t) = \begin{cases} V_m \sin \omega t & \text{untuk } 0 \leq \omega t \leq \pi \\ -V_m \sin \omega t & \text{untuk } \pi \leq \omega t \leq 2\pi \end{cases} \quad (2-9)$$

Komponen DC pada tegangan output merupakan nilai rata-rata, sedangkan arus output merupakan pembagian tegangan output dan resistansi sebagaimana ditulis pada persamaan (2-10).

$$V_{rect} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_m \sin \omega t \, d(\omega t) = \frac{2V_m}{\pi}$$

$$I_{rect} = \frac{V_{rect}}{R} = \frac{2V_m}{\pi R} \quad (2-10)$$

Daya yang diserap oleh beban resistif dapat ditentukan dari $I_{rms}^2 R$, I_{rms} dapat dihitung berdasarkan persamaan (2-11).

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (2-11)$$

2.6. Multilevel Inverter

Inverter *H-Bridge* menghasilkan tegangan output V_{out} bernilai $+V_{dc}$, 0 , $-V_{dc}$, tergantung pada konduksi *switch*. Konsep dasar pensaklaran *H-Bridge* dapat ditingkatkan menjadi rangkaian lain yang menghasilkan tambahan level tegangan output. Rangkaian ini disebut multilevel inverter. Tegangan output yang dihasilkan lebih menyerupai sinus sehingga mengandung lebih sedikit komponen harmonika.

Terdapat tiga jenis multilevel inverter, yaitu *Cascaded H-Bridge* (CHB) dengan *Separated DC Source* (SDCS), *diode clamped*, dan *flying capacitor* [5], [6], [7]. Teknik pensaklaran pada *diode clamped* dan *flying capacitor* multilevel inverter lebih rumit. Kontrol yang kompleks dibutuhkan untuk menjaga agar tegangan pada masing-masing kapasitor memiliki nilai yang sama. Diantara jenis multilevel inverter dengan teknik pensaklaran yang paling mudah adalah *Cascaded H-Bridge* multilevel inverter. Teknik pensaklaran yang digunakan sama seperti pada inverter satu fasa (*H-Bridge*). Oleh karena itu pada penelitian ini digunakan *Cascaded H-Bridge* multilevel inverter.

Konfigurasi rangkaian inverter CHB m -level satu fasa ditunjukkan pada Gambar 2.11. Masing-masing SDCS dihubungkan ke inverter *H-Bridge*. Masing-masing *H-bridge* menghasilkan tiga level tegangan output yang berbeda yaitu $+V_{dc}$, 0 , $-V_{dc}$. Tegangan output masing-masing inverter *H-Bridge* dihubungkan secara seri sehingga gelombang tegangan yang dihasilkan adalah jumlahan tegangan output pada masing-masing inverter *H-Bridge*. Jumlah level tegangan output pada multilevel inverter CHB didefinisikan melalui persamaan

$$m=2k+1 \quad (2-12)$$

k adalah jumlah SDCS dan m adalah jumlah level tegangan output.

Sebagai contoh suatu rangkaian multilevel inverter CHB dengan 4 SDCS dan 4 inverter *H-Bridge* memiliki gelombang tegangan output 9 level.

Gelombang tegangan output inverter CHB 9-level ditunjukkan pada Gambar 2.12. Transformasi Fourier untuk gelombang tersebut dituliskan pada persamaan berikut :

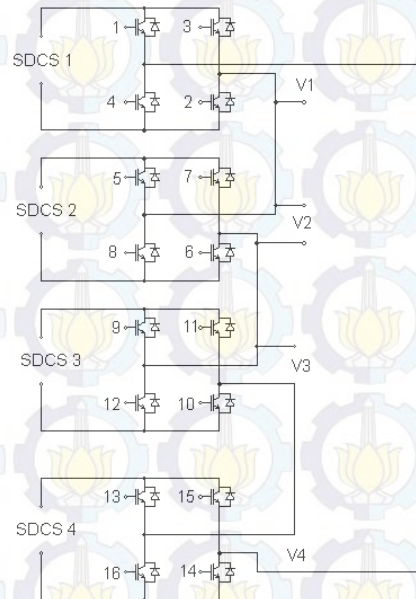
$$V(\omega t) = \frac{4V_{dc}}{\pi} \sum_n [\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \dots + \cos(n\theta_j)] \frac{\sin(n\omega t)}{n}, \quad (2-13)$$

n adalah orde harmonika = 1, 3, 5, 7, 9, ...

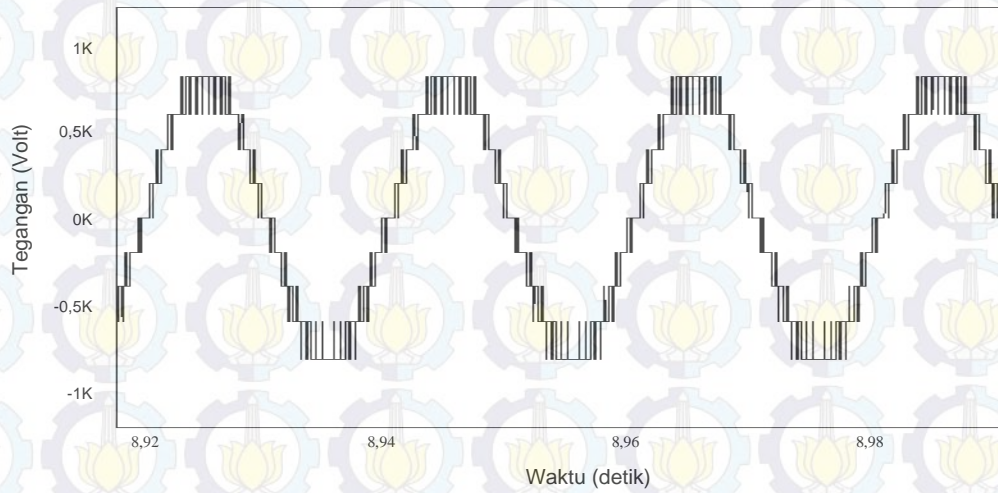
Amplitudo koefisien fourier dapat ditulis sebagai berikut :

$$V_n = \frac{4V_{dc}}{n\pi} \cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \dots + \cos(n\theta_j) \quad (2-14)$$

Untuk $n = 1, 3, 5, 7, 9, \dots$



Gambar 2.12 Konfigurasi rangkaian multilevel inverter CHB satu fasa



Gambar 2.13 Gelombang tegangan output untuk 11-level inverter CHB

Indeks modulasi M_i untuk k SDCS atau V_{dc} adalah

$$M_i = \frac{V_1}{4kV_{dc}/\pi} = \frac{\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \dots + \cos(\theta_k)}{k} \quad (2-15)$$

Untuk mengeliminasi harmonika ke- h , sudut *delay* harus memenuhi persamaan ini :

$$\cos(h\theta_1) + \cos(h\theta_2) + \dots + \cos(h\theta_k) = 0 \quad (2-16)$$

Beberapa kelebihan multilevel inverter CHB yaitu sebagai berikut [5-7] :

1. Jumlah level tegangan output lebih dari dua kali dari jumlah SDCS.
2. Konsep pensaklaran yang sederhana.
3. Multilevel inverter CHB membuat tata letak dan kemasannya termodulasi dan rapi. Hal ini memudahkan proses manufaktur lebih cepat dan murah.

Kelemahan multilevel inverter CHB adalah sebagai berikut [5-7] :

1. Sumber DC yang terpisah yang dibutuhkan oleh tiap H-Bridge. Hal ini akan membatasi aplikasi sistem yang tidak memungkinkan untuk menyediakan sumber DC terpisah.

Multilevel inverter cenderung tidak diminati jika diaplikasikan pada PLTS. Hal tersebut dikarenakan pola pensaklaran yang rumit. Multilevel inverter jenis CHB adalah jenis multilevel inverter yang paling mudah dalam proses pensaklaran. Pada penelitian ini, multilevel inverter jenis CHB diaplikasikan pada PLTS dengan konfigurasi PV yang terpusat. Output PV kemudian dipisah dengan menggunakan transformator multi belitan yang terhubung ke penyearah untuk menyediakan beberapa sumber DC terpisah untuk masing-masing *H-Bridge*.

2.7. Level Shifted Carrier Pulse Width Modulation (LSC-PWM)

Teknik Modulasi yang paling terkenal untuk CHB-MLI adalah *Phase Shifted Carrier PWM* (PSCPWM) dan *Level Shifted Carrier PWM* (LSCPWM) [5]. Teknik modulasi yang digunakan untuk CHB multilevel inverter pada penelitian ini adalah teknik LSCPWM.

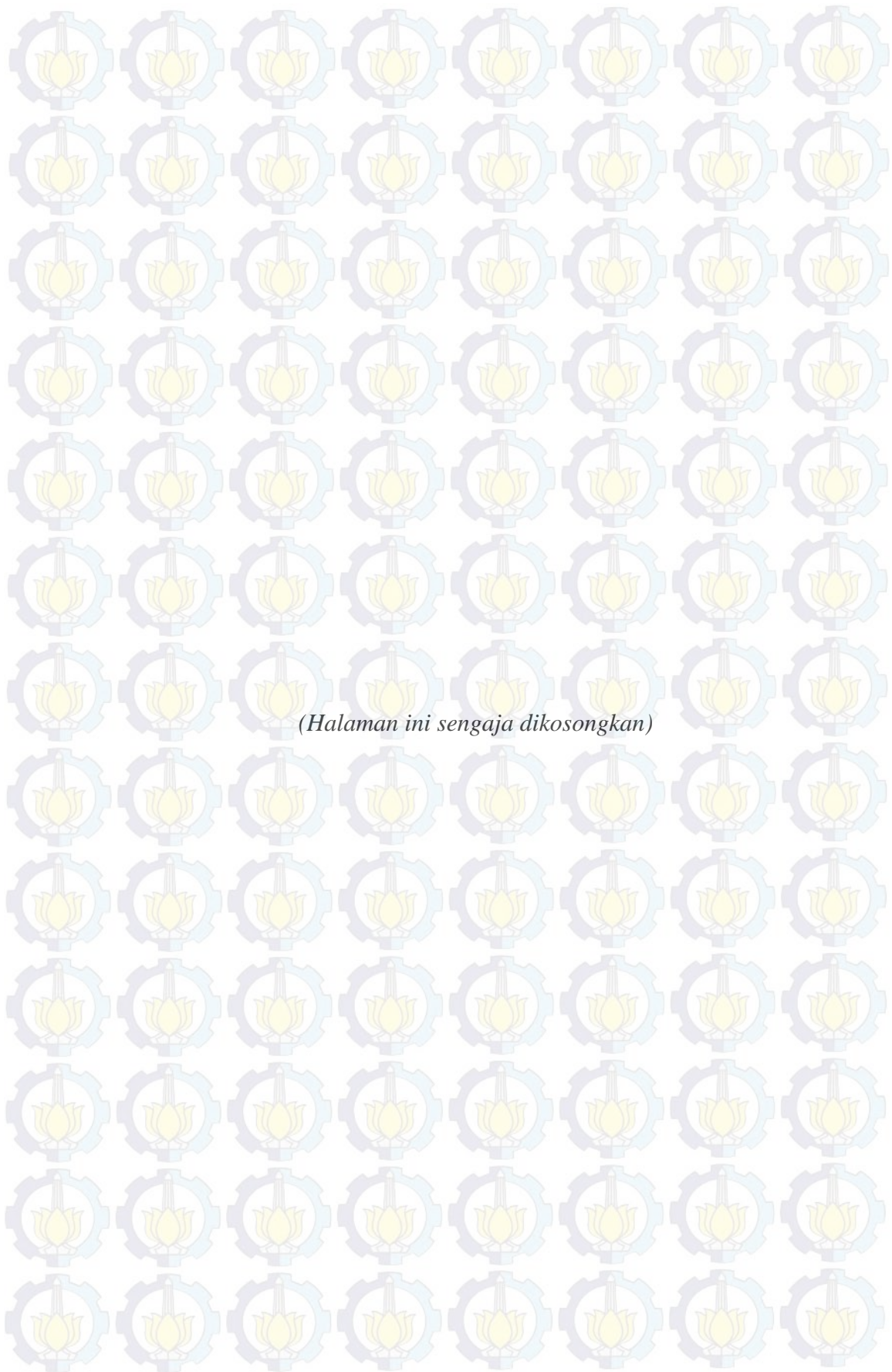
Pada LSCPWM, jika sebuah CHB-MLI dengan level tegangan output sebanyak m membutuhkan $(m-1)$ sinyal *carrier* segitiga dengan frekuensi dan amplitudo yang sama. Indeks modulasi frekuensi m_f dan amplitudo m_a ditulis pada persamaan (2-17) dan (2-18).

$$m_f = \frac{f_{cr}}{f_m} \quad (2-17)$$

f_m adalah frekuensi sinyal modulasi dan f_{cr} adalah frekuensi sinyal *carrier*.

$$m_a = \frac{V_{ref}}{V_{tri}(m-1)} \text{ untuk } 0 \leq m_a \leq 1 \quad (2-18)$$

V_{ref} adalah amplitudo sinyal modulasi dan V_{tri} adalah amplitudo sinyal *carrier*.

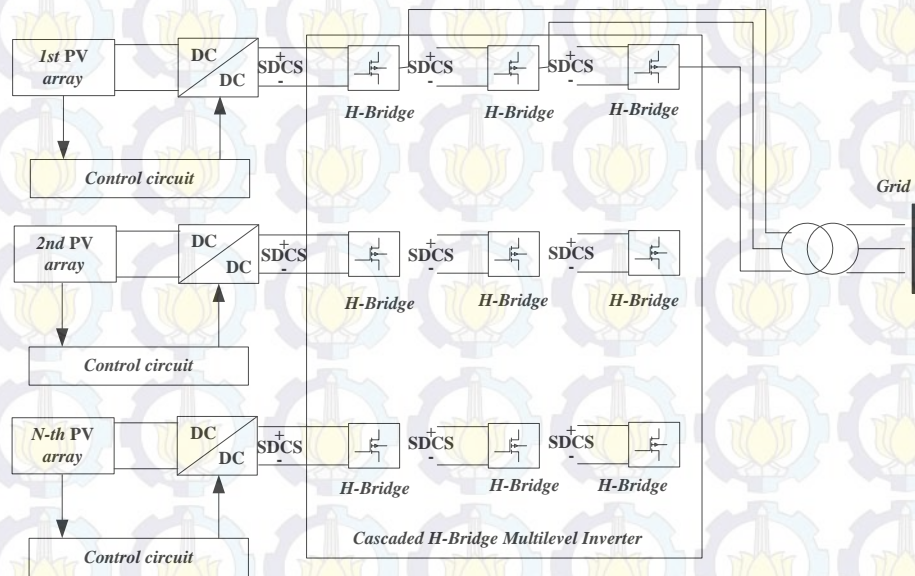


BAB 3

APLIKASI *CASCADED H-BRIDGE* MULTILEVEL INVERTER PADA PLTS

3.1. Konfigurasi Sistem

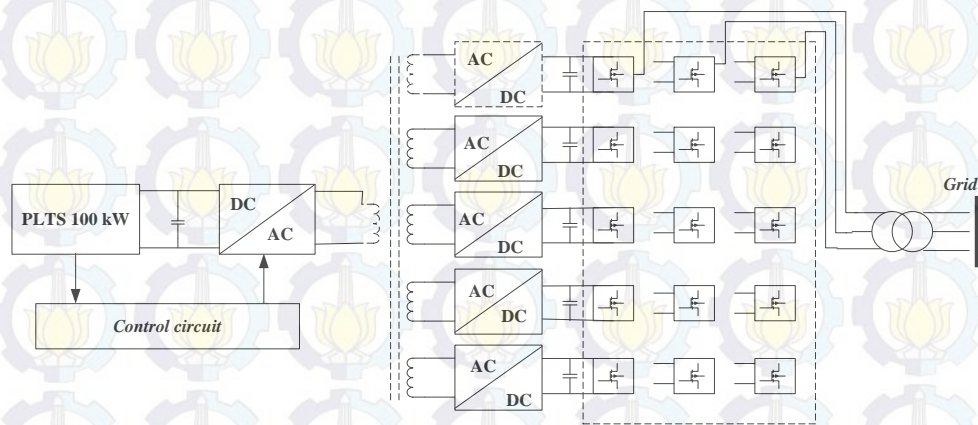
Instalasi PLTS menggunakan inverter tiga fasa dilengkapi dengan peralatan filter harmonika karena output dari inverter tiga fasa mengandung banyak komponen harmonika. Seiring dengan kemajuan ilmu elektronika daya, multilevel inverter mulai diaplikasikan. Diantara beberapa jenis multilevel inverter, CHB-MLI adalah yang paling sederhana dan mudah untuk diaplikasikan [5]. Gambar 3.1 menunjukkan konfigurasi lama untuk sistem PLTS yang mengaplikasikan CHB-MLI.



Gambar 3.1 Konfigurasi sistem pada penelitian terdahulu

Konfigurasi sistem pada Gambar 3.1, PV disusun ke dalam beberapa *array* sesuai dengan kapasitas yang diinginkan. Masing-masing PV *array* memiliki MPPT dan konverter DC-DC. Output masing-masing konverter DC-DC dihubungkan ke masing-masing inverter *H-Bridge* [8]. Karena PV disusun ke dalam beberapa *array*, hal ini mengakibatkan sumber DC yang tidak simetrik.

Pada penelitian ini, PV tidak disusun dalam bentuk *array* melainkan tersentralisasi [9]. PV disusun seri-paralel untuk mencapai kapasitas 100 kW. Sehingga hanya membutuhkan satu MPPT. Sumber DC terpisah untuk multilevel inverter disediakan dari inverter satu fasa yang dihubungkan ke *multi-winding transformer* dan penyearah tidak terkontrol. Konfigurasi sistem keseluruhan yang diusulkan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.2. Komponen utama pada sistem ini adalah *array* PV berkapasitas 100 kW, inverter satu fasa, MPPT, transformator, penyearah satu fasa tidak terkontrol, CHB-MLI, dan blok kontrol *grid*.



Gambar 3.2 Konfigurasi sistem keseluruhan yang diusulkan

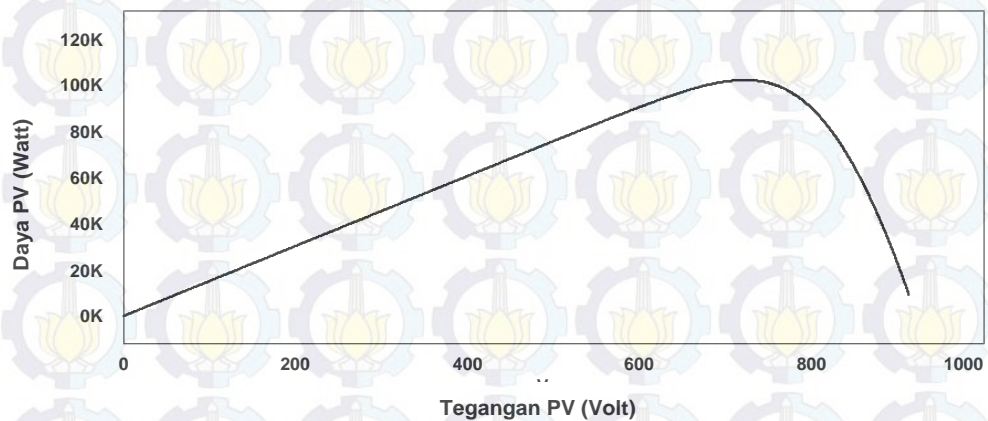
3.2. Konfigurasi PV Berkapasitas 100 KW

Untuk menghasilkan PV berkapasitas 100 kW dilakukan dengan mengkonfigurasi beberapa PV yang dihubungkan seri-paralel. PV yang digunakan memiliki spesifikasi yang identik. Spesifikasi PV yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada tabel 3.1. Spesifikasi ini didapatkan dari pengujian STC yaitu radiasi 1000 W/m^2 , AM 1,5, dan temperatur *cell* 25°C .

Tabel 3.1. Spesifikasi PV model LPC250SM pada kondisi STC

Parameter	Simbol dan satuan	Nilai
Daya maksimal	P_{max} (Wp)	250
Tegangan maksimal	V_{mpp} (V)	30,5
Arus maksimal	I_{mpp} (A)	8,20
Tegangan <i>open circuit</i>	V_{oc} (V)	37,6
Arus <i>short circuit</i>	I_{sc} (A)	8,66
Efisiensi modul	η	15,62 %

Beberapa PV yang dihubungkan seri tidak diijinkan melebihi batas tegangan maksimalnya. Pada PV model LPC250SM memiliki batas tegangan maksimal hingga 1000 V. Pada penelitian ini dirancang DC bus sebesar 750 V. Dengan kapasitas PLTS 100 kW, maka arus output yang dihasilkan adalah 133,33 A. Sehingga pada penelitian ini dibutuhkan 25 panel surya yang tersusun seri dan diparalel sebanyak 17 kali. Karakteristik PV berkapasitas 100 kW ditunjukkan pada Gambar 3.3 berikut ini.

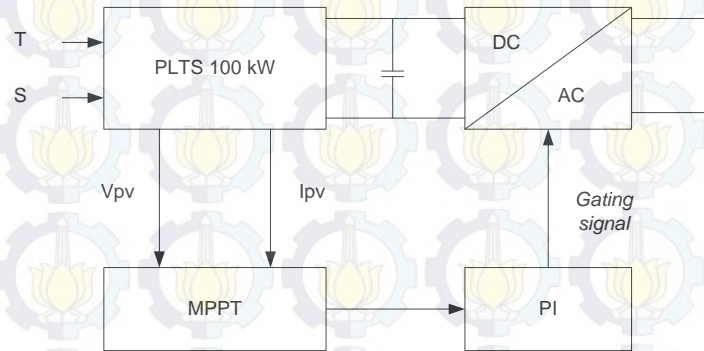


Gambar 3.3 Grafik Karakteristik P-V 100 KW

Daya output maksimal PV adalah 102 kW dengan tegangan output maksimal 722 V dan arus output maksimal 141,67 A.

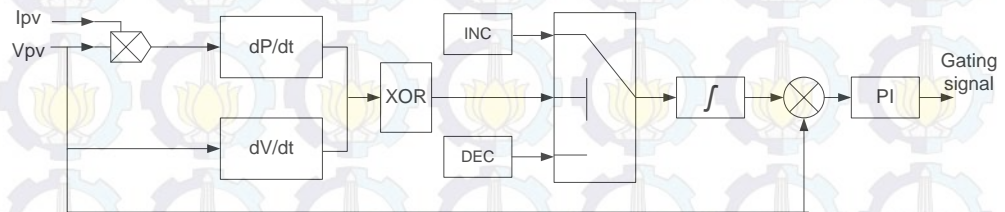
3.3. Maximum Power Point Tracker (MPPT)

Blok diagram instalasi MPPT ditunjukkan pada Gambar 3.4. Jenis konverter yang digunakan adalah konverter DC-AC (Inverter).



Gambar 3.4 Blok diagram instalasi MPPT

MPPT yang digunakan pada penelitian ini adalah jenis *Perturb & Observe* (P&O) dengan diagram proses seperti pada Gambar 3.5.

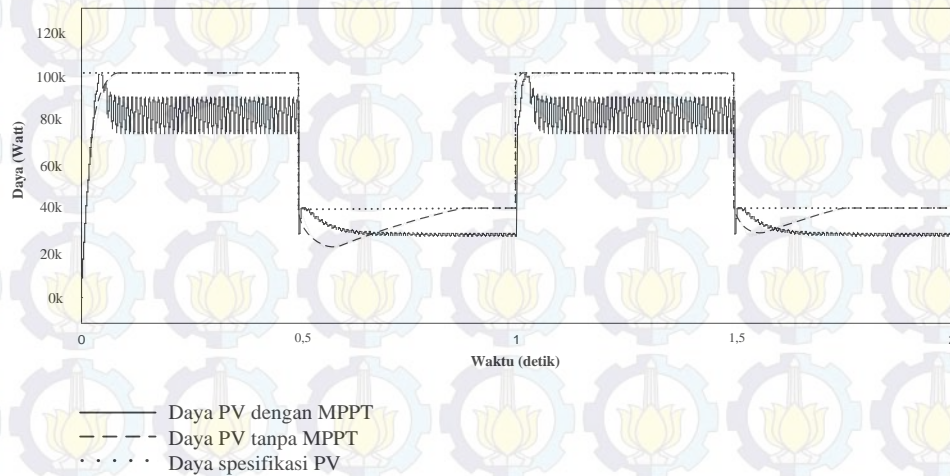


Gambar 3.5 Blok diagram proses MPPT

Pada penelitian ini dilakukan variasi nilai radiasi dari 400 W/m^2 hingga 1000 W/m^2 dan nilai temperatur *cell* dari 25°C hingga 40°C . Gambar 3.7 adalah perbandingan daya output menggunakan MPPT dan tanpa MPPT dengan variasi radiasi yang ditunjukkan pada Gambar 3.6.



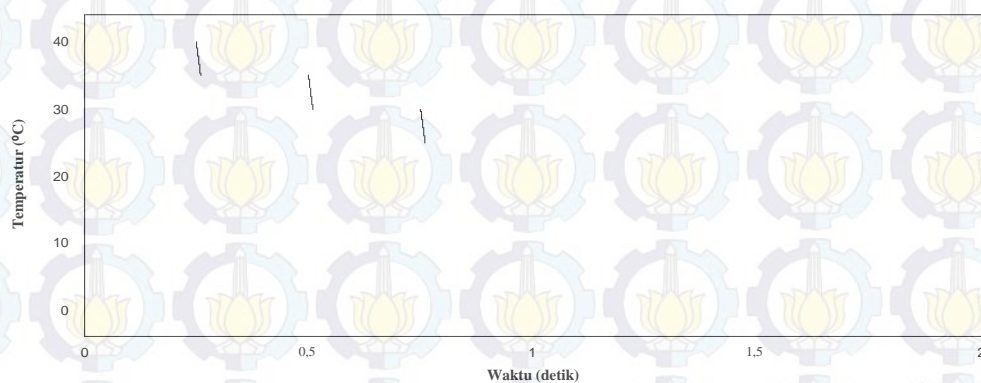
Gambar 3.6 Variasi nilai radiasi



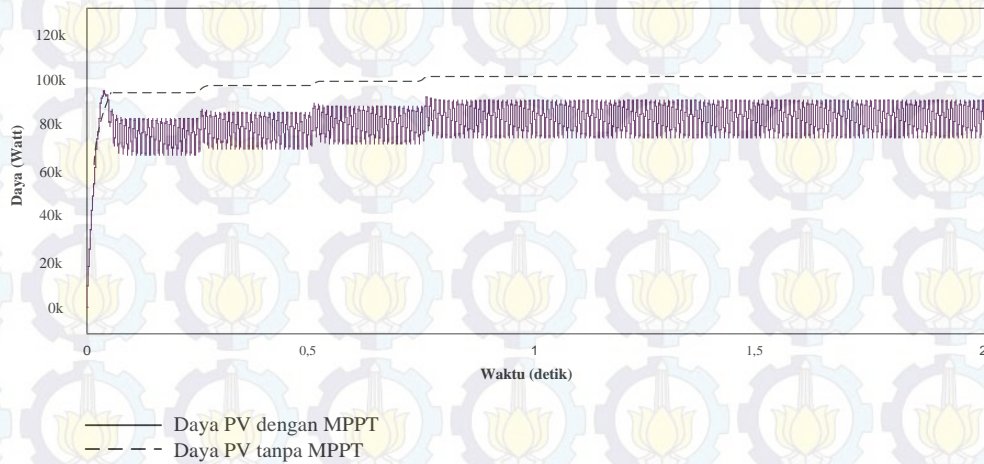
Gambar 3.7 Perbandingan daya output dengan variasi nilai radiasi

Pada Gambar 3.7 dapat dilihat bahwa PV dengan MPPT mampu mencapai daya maksimal sesuai dengan spesifikasi PV. Ketika radiasi 1000 W/m^2 , daya PV dengan MPPT adalah 100 kW. Ketika radiasi 400 W/m^2 , daya PV dengan MPPT adalah 40 kW. Daya PV tanpa MPPT tidak mampu mencapai nilai maksimal sesuai dengan daya spesifikasi.

Pada Gambar 3.9 ditunjukkan perbandingan nilai daya PV dengan MPPT dan tanpa MPPT untuk variasi nilai temperatur *cell* dari 25°C hingga 40°C dengan nilai radiasi dibuat tetap 1000 W/m^2 .



Gambar 3.8 Variasi nilai temperatur



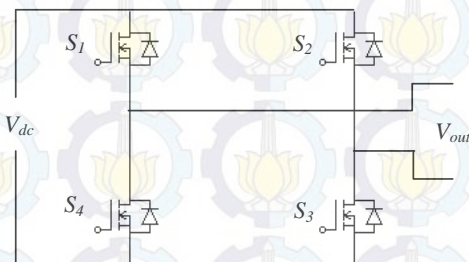
Gambar 3.9 Perbandingan daya output dengan variasi temperatur

3.4. Desain Inverter Satu Fasa

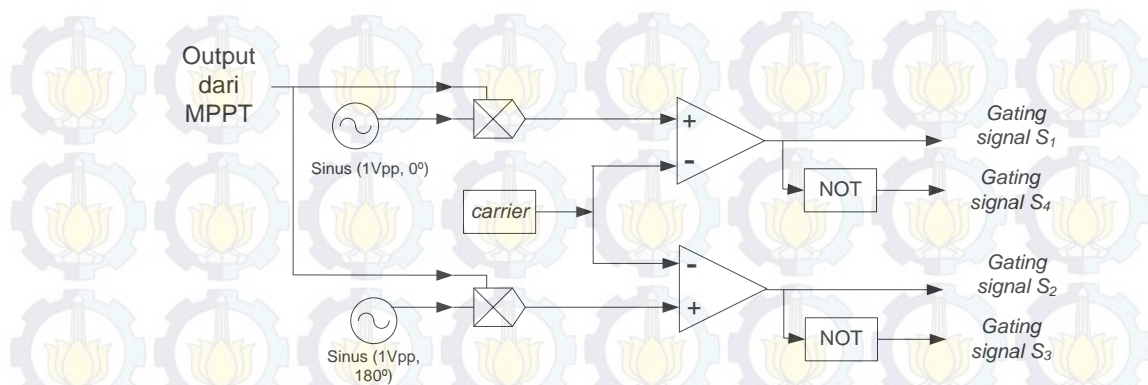
Pada penelitian ini, inverter dirancang agar bisa mencapai nilai daya maksimal PV. Gambar 3.10 merupakan Gambar inverter satu fasa yang terdiri dari 2 pasang saklar (S_1 & S_3 dan S_2 & S_4) yang bekerja yang bergantian. Tegangan output inverter dapat dihitung dengan persamaan berikut.

$$V_{out_inv} = m_a \frac{V_{in_DC}}{\sqrt{2}} = 0,9 \frac{750}{\sqrt{2}} = 450V$$

Teknik modulasi yang digunakan untuk inverter pada penelitian ini adalah *unipolar Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM). *Unipolar* SPWM membutuhkan dua buah komparator, dua buah sinyal referensi atau modulasi, dan satu buah sinyal *carrier* segitiga. Frekuensi *switching* yang digunakan pada sinyal *carrier* adalah 1 kHz sedangkan frekuensi sinyal modulasi adalah 50 Hz. Gambar 3.11 menunjukkan blok diagram teknik modulasi *unipolar* SPWM.



Gambar 3.10 Rangkaian inverter satu fasa



Gambar 3.11 Blok diagram Teknik Modulasi Inverter

3.5.Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter (CHB-MLI)

CHB multilevel inverter memerlukan sumber DC yang terpisah untuk masing-masing inverter *H-Bridge*. Pada penelitian ini, level tegangan output yang dikehendaki adalah sebanyak 9 level. Jumlah sumber DC yang dibutuhkan untuk CHB multilevel inverter agar dapat dihasilkan 9-level tegangan output dapat dihitung menggunakan persamaan (2-12).

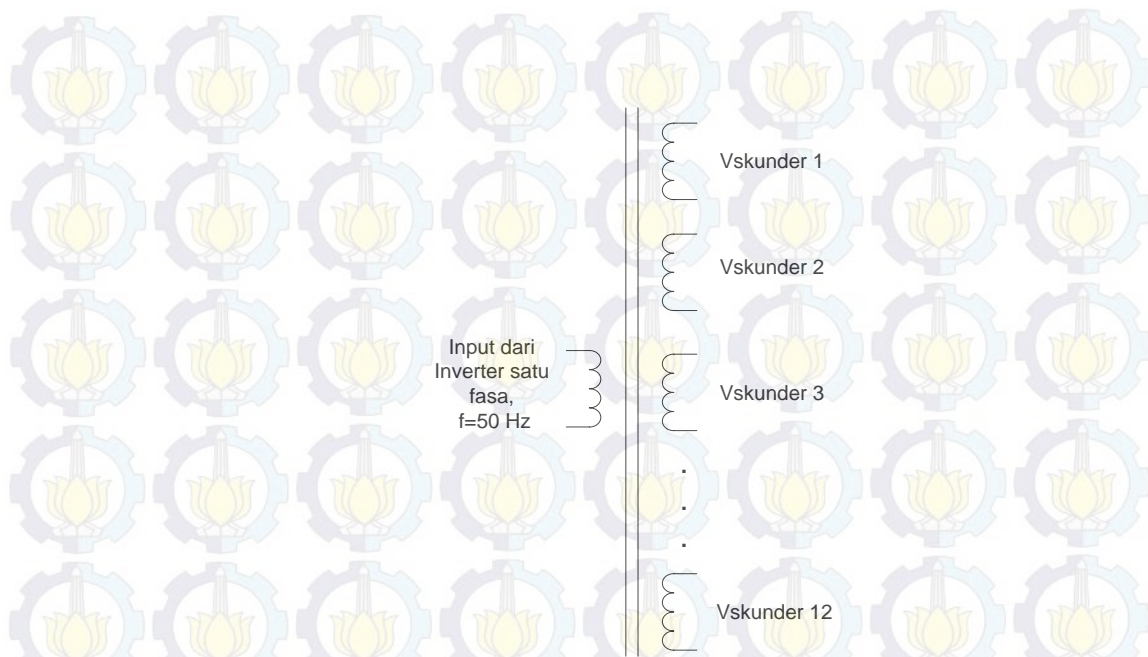
$$m=2k+1$$

$$9=2k+1$$

$$k=4$$

Dari perhitungan di atas dapat diketahui bahwa untuk menghasilkan 9-level tegangan output, dibutuhkan 4 sumber DC terpisah untuk masing-masing fasa. Sehingga total sumber DC terpisah yang dibutuhkan untuk sistem tiga fasa adalah sebanyak 12 buah. Untuk menyediakan 12 sumber DC maka dibutuhkan transformator dengan 12 belitan pada sisi sekunder dan 12 penyearah.

Transformator multi-belitan menyediakan 12 belitan pada sisi sekunder ditunjukkan pada Gambar 3.12. Rasio belitan yang digunakan adalah 1:1.



Gambar 3.12 Transformator multi-belitan

Tegangan output masing-masing transformator pada sisi sekunder disearahkan untuk menghasilkan sumber DC. Penyearah yang digunakan pada penelitian ini adalah penyearah gelombang penuh menggunakan dioda. Parameter penting dalam desain penyearah adalah sumber DC yang dihasilkan harus mendekati DC murni atau persentase *ripple* yang dimiliki sangat kecil. *Ripple* adalah komponen *Alternating Current* (AC) yang masih terdapat pada gelombang DC akibat proses penyearahan yang tidak sempurna. Untuk menghitung tegangan output dapat menggunakan persamaan (2-10). Namun, agar tegangan output penyearah mendekati input tegangan maksimal AC maka dapat dipilih kapasitor dengan kapasitansi yang besar agar dihasilkan persentase *ripple* yang kecil. Pada penelitian ini, dipilih kapasitor dengan kapasitansi 1 F.

$$V_{rect} \approx V_{in_max}$$

$$V_{rect} \approx \sqrt{2}V_{out_inv} \quad (\text{untuk nilai } C \text{ yang sangat besar})$$

$$V_{rect} \approx 600 \text{ V}$$

Dengan desain yang identik untuk masing-masing penyearah maka output DC yang dihasilkan juga identik. Blok diagram instalasi penyearah ditunjukkan pada Gambar 3.13.

Gambar 3.13 Blok diagram instalasi penyearah

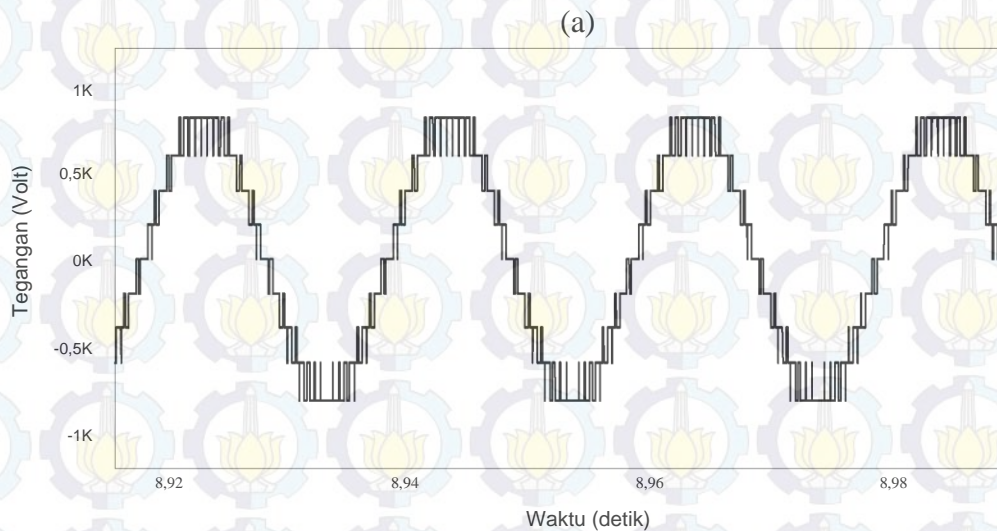
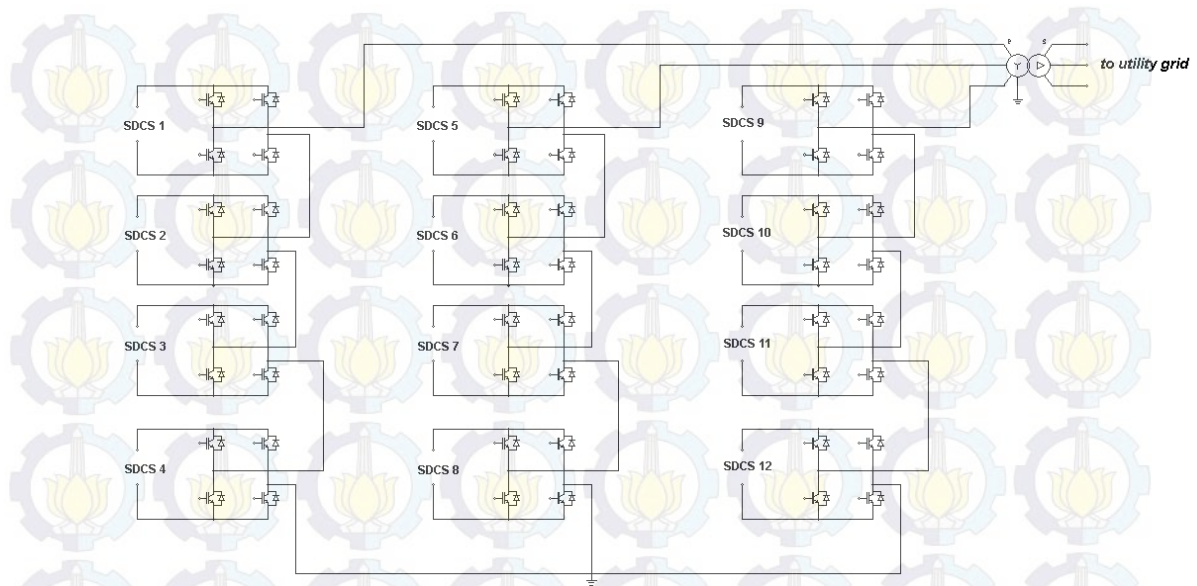
Pada Gambar 3.14(a) ditunjukkan rangkaian CHB-MLI tiga fasa. Terdapat 4 buah *H-Bridge* yang terhubung seri tiap fasa. Masing-masing *H-Bridge* dicatu dengan amplitudo tegangan DC yang sama. Sehingga tegangan output maksimum CHB-MLI adalah sebagai berikut

$$V_{\max_CHB} = \text{jumlah SDCS} \times V_{SDCS}$$

$$V_{\max_CHB} = 4 \times 600 \text{ V} = 2,4 \text{ kV}$$

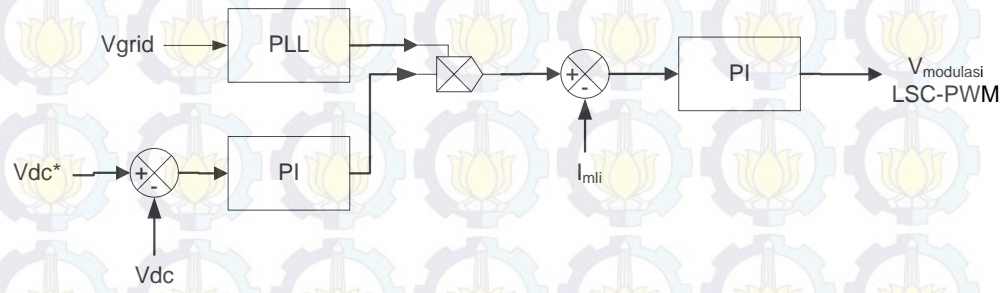
$$V_{\max_CHB} = \text{jumlah SDCS} \times V_{SDCS}$$

$$V_{\max \text{ CHB}} = 4 \times 600 \text{ V} = 2,4 \text{ kV}$$



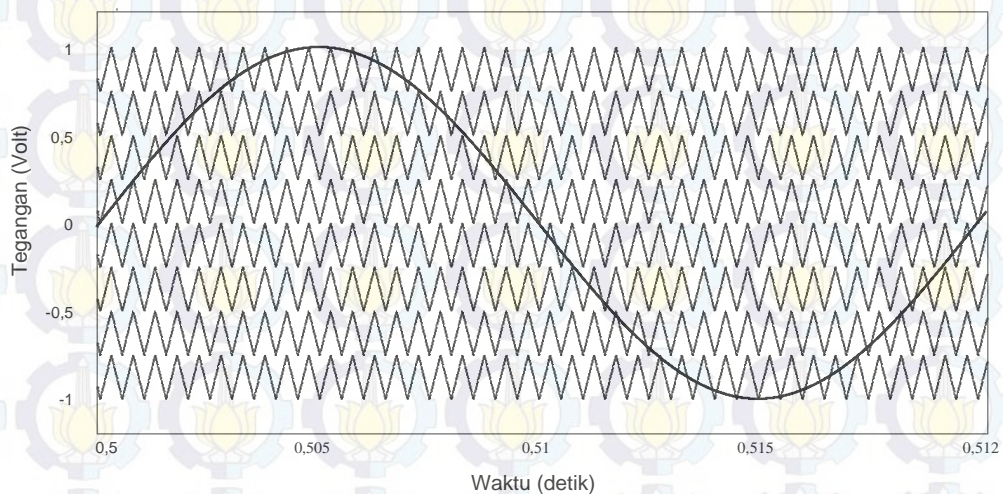
Gambar 3.14 (a) Rangkaian CHB-MLI; (b) Tegangan Output CHB-MLI 9 level

Agar output tegangan CHB-MLI memiliki amplitudo, frekuensi, dan fasa yang sama dengan saluran distribusi maka diperlukan kontrol otomatis pada CHB-MLI. Sehingga bila ada perubahan di sisi beban, output CHB-MLI mampu menyesuaikan secara otomatis. Blok diagram kontrol tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.15, output dari blok diagram proses ini adalah sinyal modulasi *Level Shifted Carrier* (LSC)-PWM sebagai teknik *switching* CHB-MLI.



Gambar 3.15 Blok diagram kontrol CHB-MLI

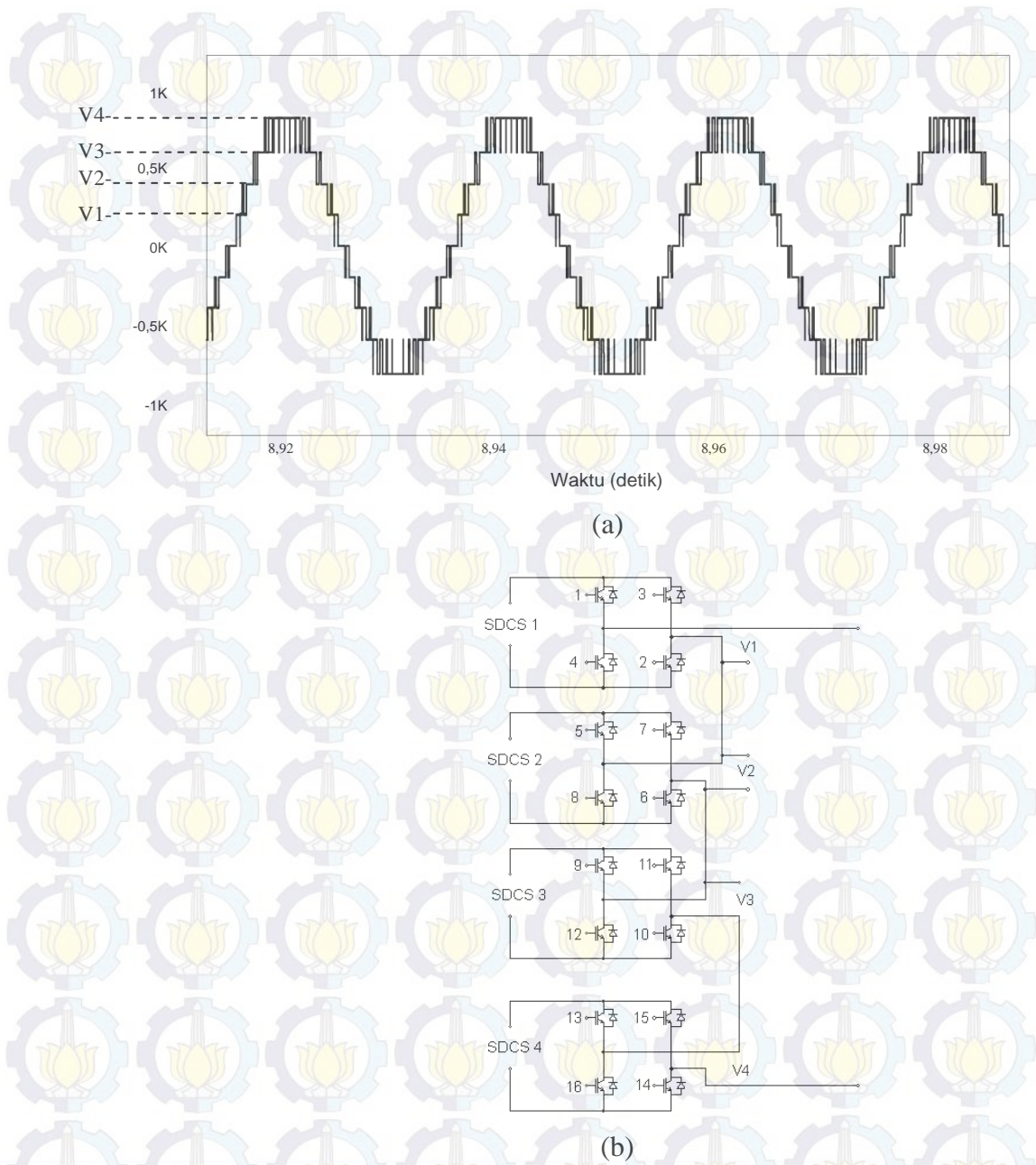
Pada LSC-PWM, bila sebuah *cascaded H-Bridge Inverter* dengan level tegangan output sebanyak m membutuhkan $(m-1)$ sinyal *carrier* segitiga dengan frekuensi dan amplitudo yang sama. Sehingga pada penelitian ini dibutuhkan 8 sinyal *carrier* segitiga. Frekuensi *switching* yang digunakan adalah 2 kHz.



Gambar 3.16 Teknik *Switching* LSC-PWM

Teknik *switching* LSC-PWM seperti teknik *switching* inverter satu fasa (*H-Bridge*) karena CHB-MLI terdiri dari beberapa *H-Bridge* yang tersusun *cascaded* (Seri).

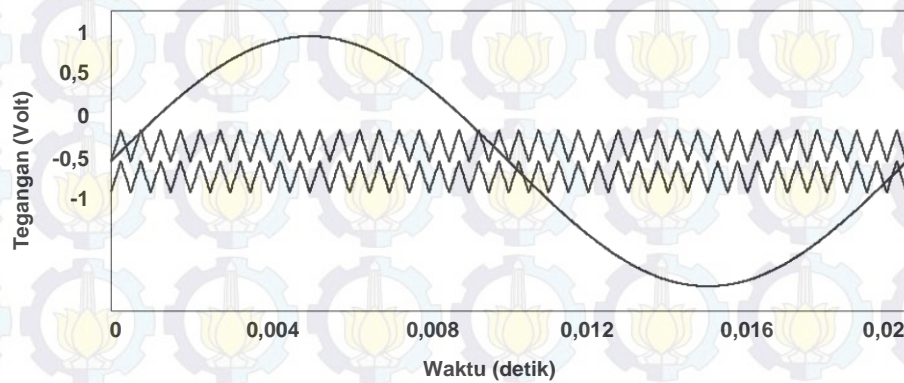
Pada Gambar 3.17, tegangan V_1 dihasilkan dari proses *switching* pada *H-Bridge* pertama. Pensaklaran pada *H-Bridge* pertama ditunjukkan pada tabel 3.2. Pensaklaran pada *H-Bridge* pertama diperoleh dari perbandingan sinyal modulasi dan sinyal *carrier* seperti ditunjukkan pada Gambar 3.18.



Gambar 3.17 (a) Tegangan output CHB-MLI; (b) Konfigurasi CHB-MLI fasa A

Tabel 3.2. *Switching H-Bridge pertama*

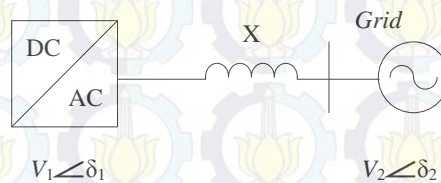
Switch	S_1	S_2	S_3	S_4
Kondisi	0	1	0	1



Gambar 3.18 Perbandingan sinyal modulasi dan sinyal *carrier* untuk *H-Bridge* pertama

Untuk *H-Bridge* ke-2 hingga ke-12 berlaku prinsip *switching* yang sama. Tegangan output dari masing-masing *H-Bridge* (V1, V2, V3, dan V4) dihubungkan seri sehingga di dapatkan tegangan seperti pada Gambar 3.17a.

Output CHB-MLI dihubungkan ke *grid* melalui transformator. Dalam hal ini dapat diasumsikan sebuah induktor.



Gambar 3.19 Interkoneksi CHB-MLI ke *grid*

Daya dari CHB-MLI ke *grid* (P_{12}) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut.

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2}{X} \sin(\delta_1 - \delta_2)$$

$$95,5\text{k} = \frac{333,61 \times 333,61}{X} \sin(0^\circ - (-30^\circ))$$

$$X = 0,58\Omega$$

Karena $X = 2\pi fL$, maka $L = 1,85\text{ mH}$.

Tabel 3.3 Rating Spesifikasi Sistem

<i>Device</i>	Parameter	Nilai/Keterangan
PV	Tegangan output PV	750 V
	Daya output PV	102 kW
	Algoritma MPPT	<i>Perturb & Observe</i>
Inverter satu fasa	Tegangan output inverter	450 V
	Daya output inverter	102 kW
	Frekuensi <i>switching</i> (carrier)	1 kHz
	Frekuensi sinyal modulasi	50 Hz
	Teknik <i>switching</i>	<i>Unipolar SPWM</i>
Rectifier	Tegangan output	600 V
	Filter kapasitor	1 F
Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter	Jumlah SDCS tiap fasa	4
	Tegangan output maks (V_{\max})	2,4 kV
	Frekuensi <i>switching</i> (carrier)	2 kHz
	Frekuensi sinyal modulasi	50 Hz
	Teknik <i>switching</i>	<i>Level shifted carrier</i> PWM
Grid	Reaktansi	1,85 mH
	Tegangan (V_{L-L})	20 kV

BAB 4

HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Pada bab ini akan diuraikan hasil simulasi rancangan sistem yang telah ditulis pada bab 3. Analisis yang dilakukan adalah simulasi sistem dengan variasi nilai radiasi, temperatur, dan perbandingan antara sistem menggunakan MPPT dan sistem tanpa menggunakan MPPT.

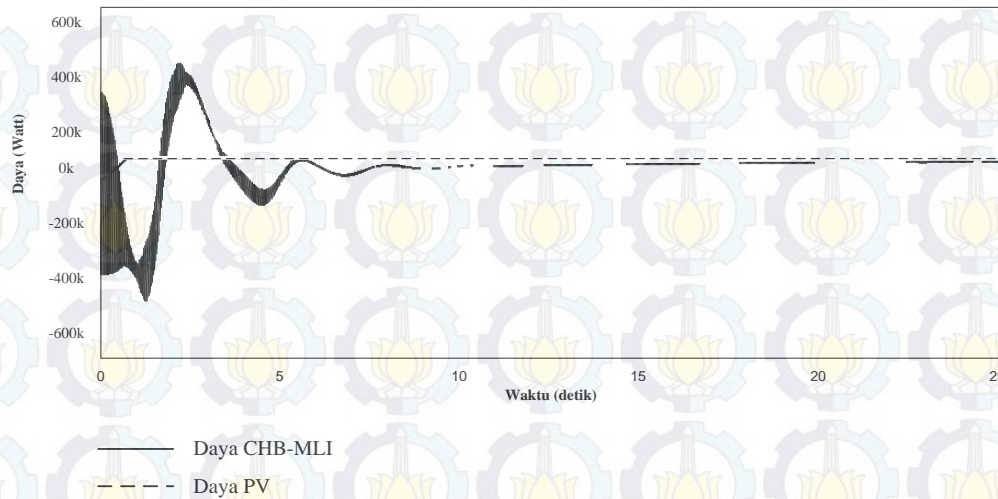
4.1. Perbandingan Antara Sistem dengan MPPT dan Sistem tanpa MPPT

Keunggulan MPPT adalah sistem dapat mencapai daya maksimum PV yang seharusnya dapat dicapai. Sehingga setiap instalasi PLTS harus menggunakan MPPT agar diperoleh daya dan efisiensi yang maksimum. Berikut adalah hasil daya output PV dan daya output CHB-MLI tanpa MPPT dibandingkan dengan spesifikasi daya maksimum PV. Simulasi dilakukan pada radiasi 1000 W/m^2 dan temperatur 25°C .

Tabel 4.1 Nilai Daya Output tanpa MPPT

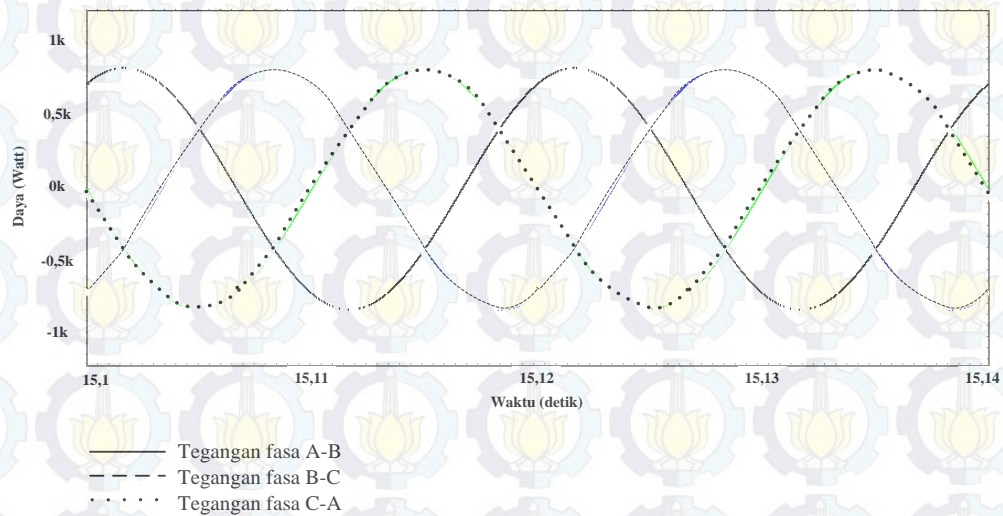
Daya Output		
Spesifikasi	PV	CHB-MLI
102 kW	38,4 kW	30 kW

Hasil daya output PV dan daya output CHB-MLI tidak dapat mencapai daya spesifikasi. Daya output PV 39,4 kW dan daya output CHB-MLI adalah 30 kW. Nilai tersebut sangat jauh jika dibandingkan dengan daya spesifikasi yaitu 102 kW. Agar PV dapat mencapai daya maksimum sesuai dengan spesifikasi PV maka digunakan MPPT. Gambar 4.1 adalah daya output PV dan CHB-MLI dengan MPPT dibandingkan dengan daya spesifikasi. Simulasi dilakukan pada radiasi 1000 W/m^2 dan temperatur 25°C .

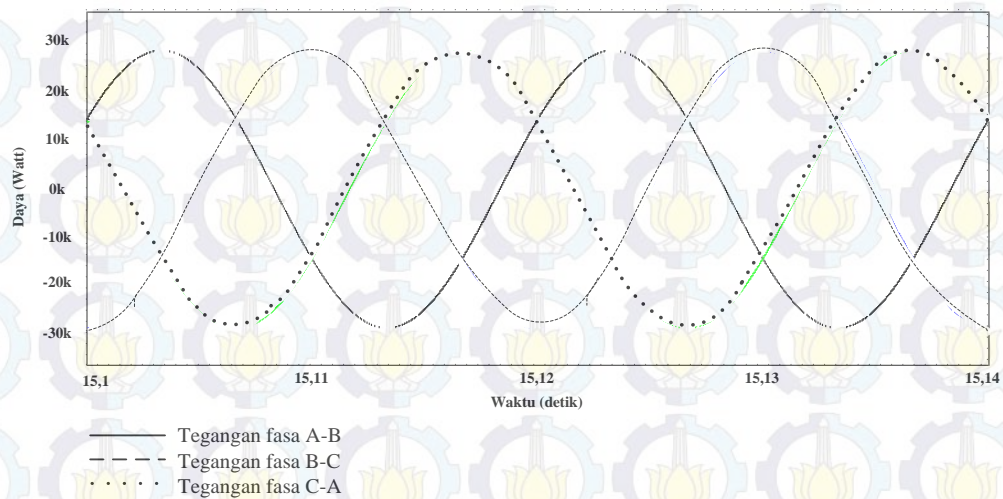


Gambar 4.1 Daya output PV dan CHB-MLI dengan MPPT

Nilai daya output PV dan CHB-MLI adalah 102 kW. Daya output CHB-MLI mencapai *steady state* pada waktu 11 detik. *Total Harmonic Distortion (THD)* yang terkandung sangat kecil yaitu 0,046 %. Tegangan output ditunjukkan pada Gambar 4.2.



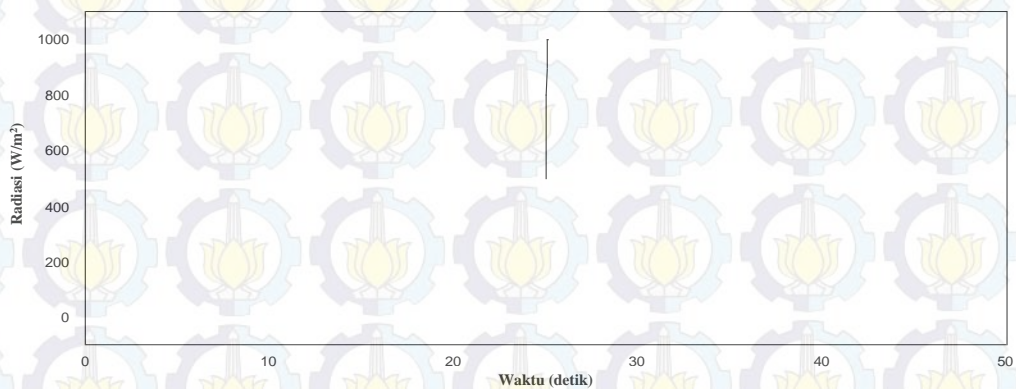
Gambar 4.2 Tegangan output CHB-MLI



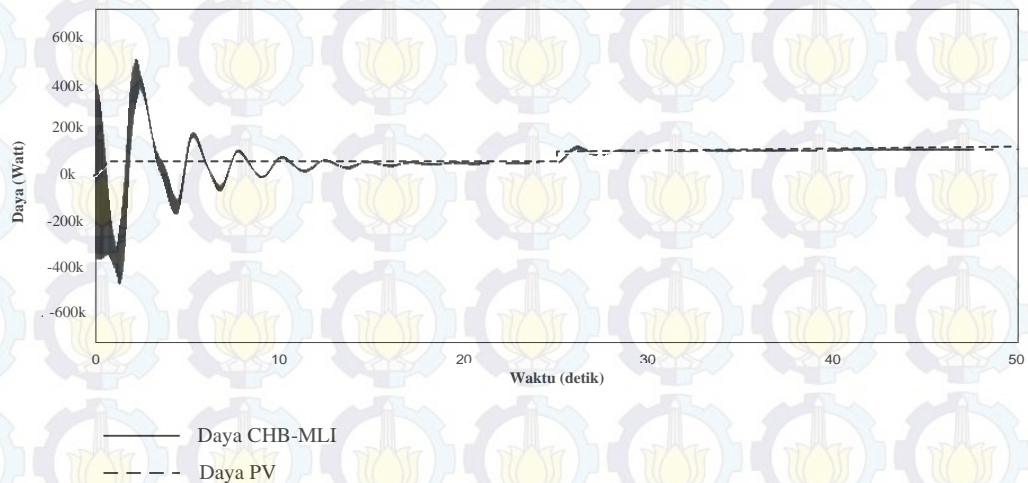
Gambar 4.3 Tegangan output *Grid*

4.2. Pengujian Sistem dengan Variasi Radiasi

Pengujian dengan variasi radiasi dilakukan untuk menguji kehandalan sistem jika diberikan intensitas cahaya matahari yang berubah-ubah. Pada penelitian ini dilakukan simulasi dengan 2 variasi radiasi yaitu 500 W/m^2 dan 1000 W/m^2 . Hal ini dikarenakan respon sistem yang cukup lama untuk mencapai *steady state* yaitu 11 detik.



Gambar 4.4 Variasi radiasi 1000 W/m^2 dan 500 W/m^2



Gambar 4.5 Daya output CHB-MLI dengan variasi radiasi

Tabel 4.2 Nilai Daya Output

Radiasi (W/m ²)	Daya Output		
	Spesifikasi	PV	CHB-MLI
1000	102 kW	102,05 kW	95,5 kW
500	51,45 kW	51,3 kW	37,7 kW

Pengujian sistem juga dilakukan dengan beberapa kali mengganti nilai radiasi agar dapat diketahui responnya secara terperinci. Pengujian dilakukan 5 kali simulasi dengan nilai radiasi 1000 W/m², 800 W/m², 600 W/m², 400 W/m², dan 300 W/m². Hasil pengujian disajikan pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian dengan 5 nilai Radiasi

Radiasi (W/m ²)	Daya Output			Persentase error
	Spesifikasi (kW)	PV (kW)	CHB-MLI (kW)	
1000	102	102	95,5	6,37 %
800	82,2	81,8	68,89	15,78 %
600	61,8	61,6	48,67	20,99 %
400	41	40,93	30,52	25,4 %
300	31	30,47	20,88	31,4 %

Nilai radiasi minimum yang dapat diujikan pada sistem dengan hasil yang baik adalah 400 W/m^2 dengan persentase error 25,4%. Persentase error terbesar terjadi pada nilai radiasi 300 W/m^2 yaitu 31,4%.

4.3. Pengujian Sistem dengan Variasi Temperatur

Setiap PV selalu diuji dengan radiasi dan temperatur tertentu. Standart pengujian PV adalah dengan nilai radiasi 1000 W/m^2 dan temperatur 25°C . Pengujian dengan nilai radiasi telah dilakukan untuk mengetahui perbandingan daya output CHB-MLI terhadap daya spesifikasi serta untuk mengetahui kestabilan daya output CHB-MLI. Pengujian temperatur juga dilakukan untuk tujuan yang sama. Hasil pengujian disajikan pada tabel 4.3.

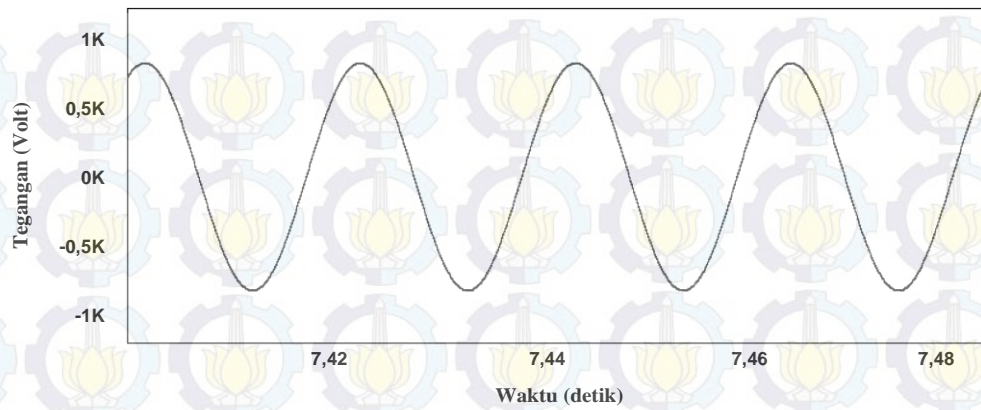
Tabel 4.3 Hasil Pengujian dengan Variasi Nilai Temperatur

Temperatur ($^\circ\text{C}$)	Daya Output			Persentase error (%)
	Spesifikasi (kW)	PV (kW)	CHB-MLI (kW)	
25	102	102	95,5	6,37 %
30	100	99,34	87,42	11,91 %
35	98	97,21	85,63	11,91 %
40	96	95,09	84,42	11,22 %
45	94	93,48	82,17	12,1 %

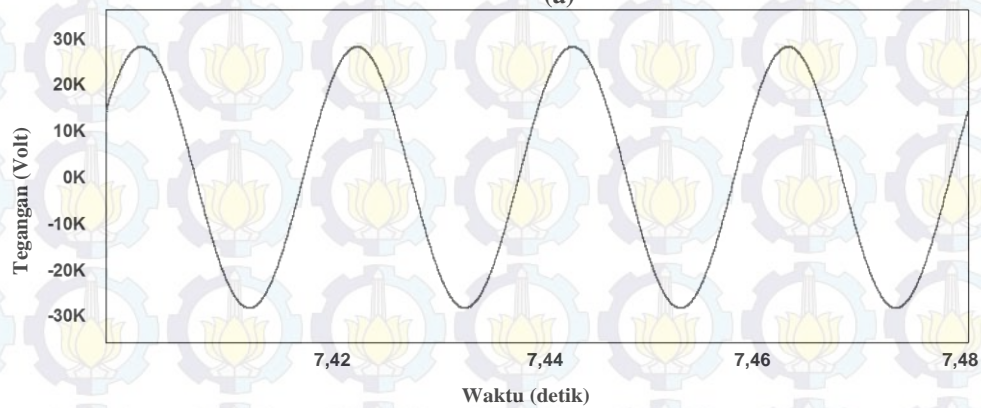
Penurunan efisiensi PV terjadi ketika nilai temperatur naik. Pada kondisi temperatur yang ekstrim yaitu 45°C daya PV adalah 93,48 kW sedangkan nilai STC adalah 102 kW, sehingga terjadi penurunan daya sebesar 8,52 kW atau sebesar 8,3 %.

4.4. Analisis Harmonika

Gelombang tegangan output CHB-MLI dan *grid* pada Gambar 4.6. Nilai THD pada tegangan output CHB-MLI dan *grid* adalah 0,000457 atau 0,046%.



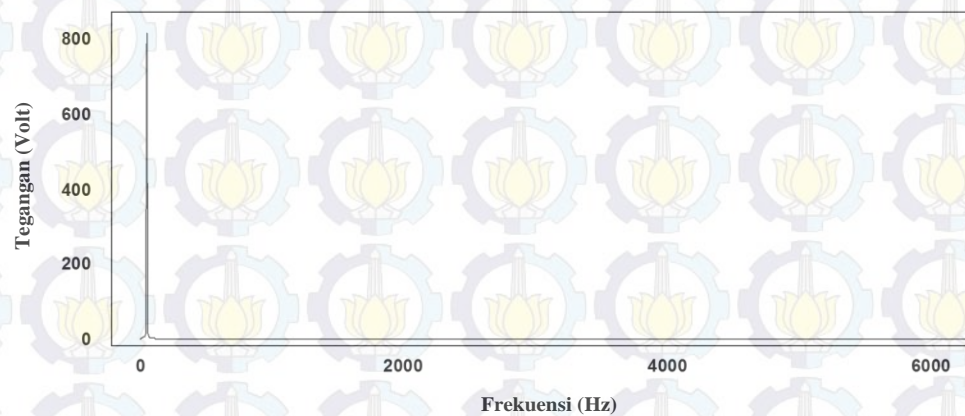
(a)



(b)

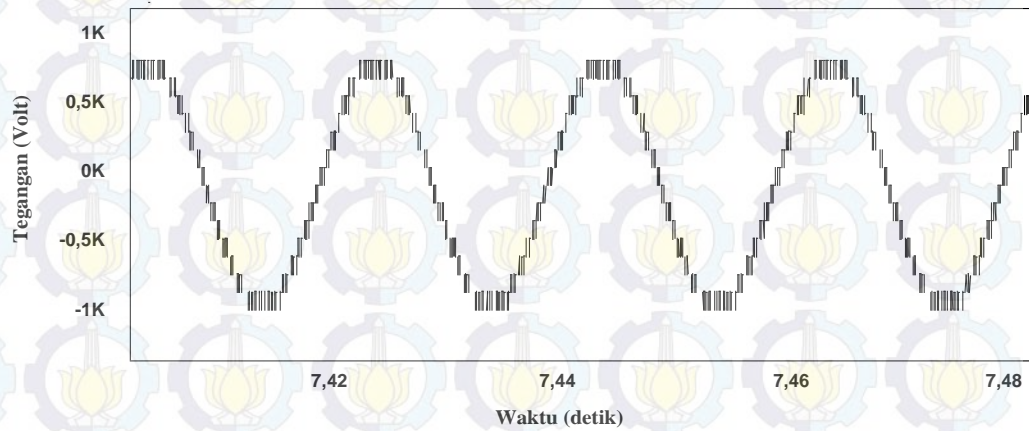
Gambar 4.6 (a) Tegangan output CHB-MLI; (b) Tegangan *grid*

Spektrum harmonika untuk tegangan output CHB-MLI ditunjukkan pada Gambar 4.7. Nilai tegangan fundamental atau tegangan pada frekuensi 50 Hz (V_1) adalah 815,92 V. Harmonika muncul pada frekuensi 4 kHz dengan amplitudo sebesar 0,043 V.



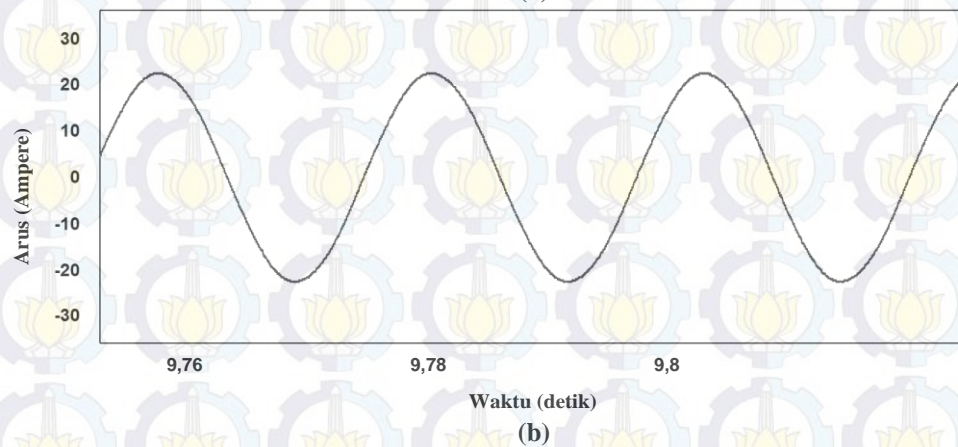
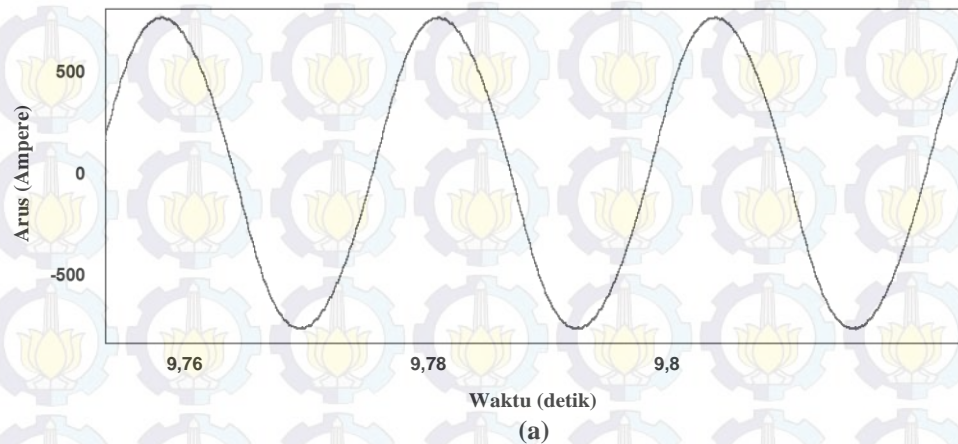
Gambar 4.7 Spektrum harmonika tegangan output CHB-MLI

Gelombang tegangan sebelum filter memiliki kandungan harmonika sebesar 7,8%. Gelombang tegangan ditunjukkan pada Gambar 4.8.



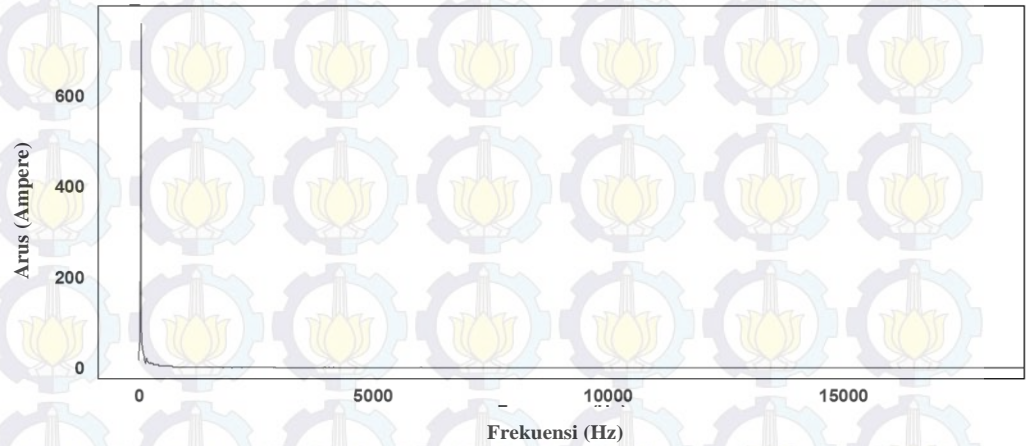
Gambar 4.8 Gelombang tegangan yang diukur sebelum filter

Gelombang arus output CHB-MLI dan *grid* ditunjukkan pada Gambar 4.9. Nilai *THD* pada arus output CHB-MLI adalah 2,1% dan *grid* adalah 0,55%.



Gambar 4.9 (a) Arus output CHB-MLI; (b) Arus *grid*

Spektrum harmonika untuk arus output CHB-MLI ditunjukkan pada Gambar 4.10. Harmonika muncul pada frekuensi 3950 Hz dan 4050 Hz dengan amplitudo masing-masing adalah 0,72 A dan 0,688 A.



Gambar 4.10 Spektrum harmonika arus output CHB-MLI

BAB 5

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

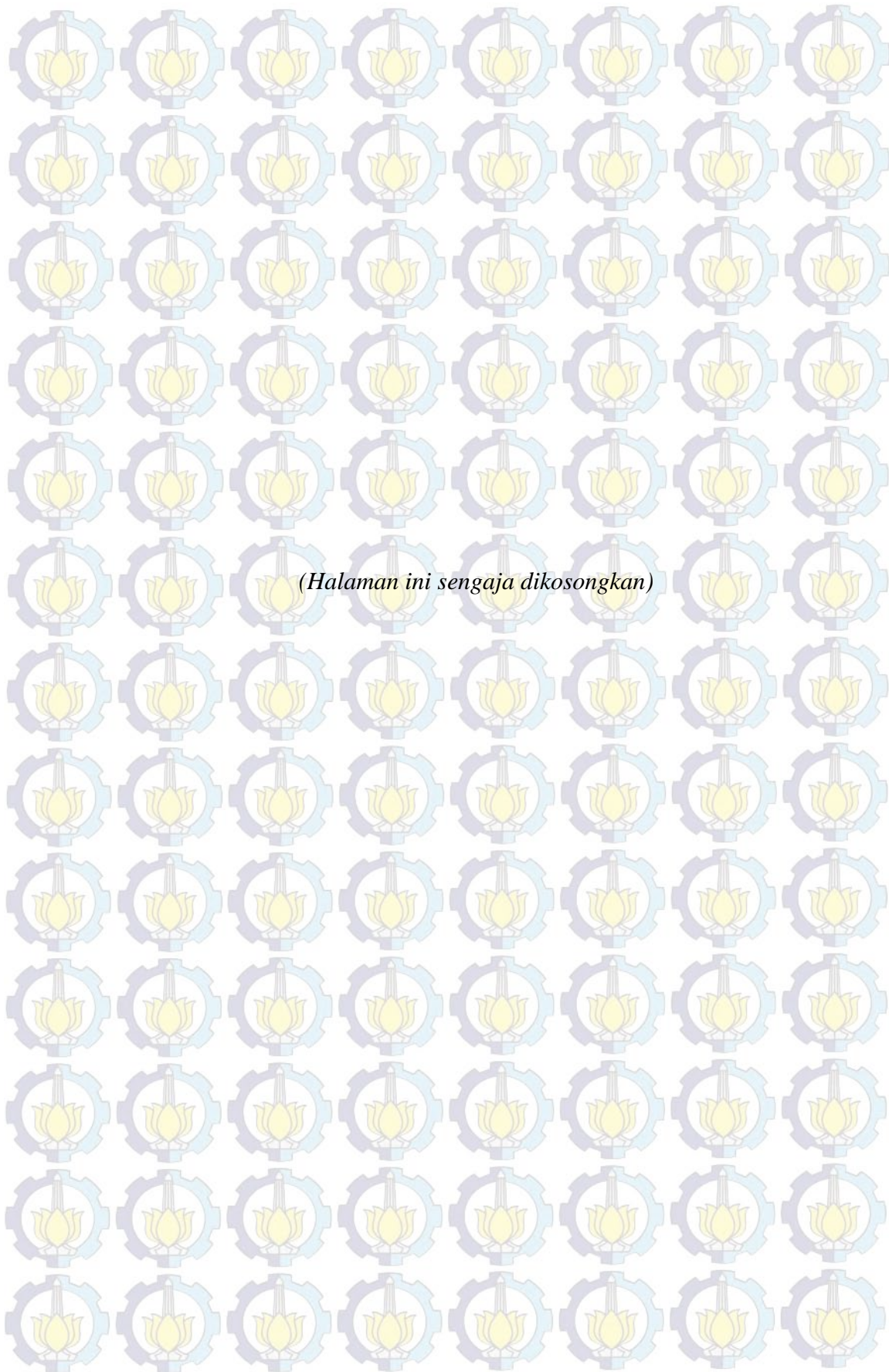
Sistem *Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter* telah didesain dan disimulasi dalam tesis ini. Beberapa hasil yang dapat disimpulkan pada sistem ini adalah:

1. Persentase error daya output CHB-MLI terhadap PV ketika dilakukan variasi radiasi adalah 6% - 25 %. Persentase error 25% terjadi ketika radiasi 400 W/m². Ketika dilakukan variasi nilai temperatur adalah 6% - 12 %. Persentase error 12 % terjadi ketika temperatur *cell* 45 °C.
2. Pada kondisi STC, CHB-MLI mampu mentransfer daya dari PV ke *grid* sebesar 95,5 KW dengan efisiensi tracking sebesar 93,6%. Kandungan harmonisa tegangan output CHB-MLI sebesar 0,046%.
3. Aplikasi CHB-MLI dengan konfigurasi PV yang terpusat hanya memerlukan satu MPPT *controller* sehingga lebih mudah untuk menyeimbangkan SDCS untuk CHB-MLI.

5.2. Saran

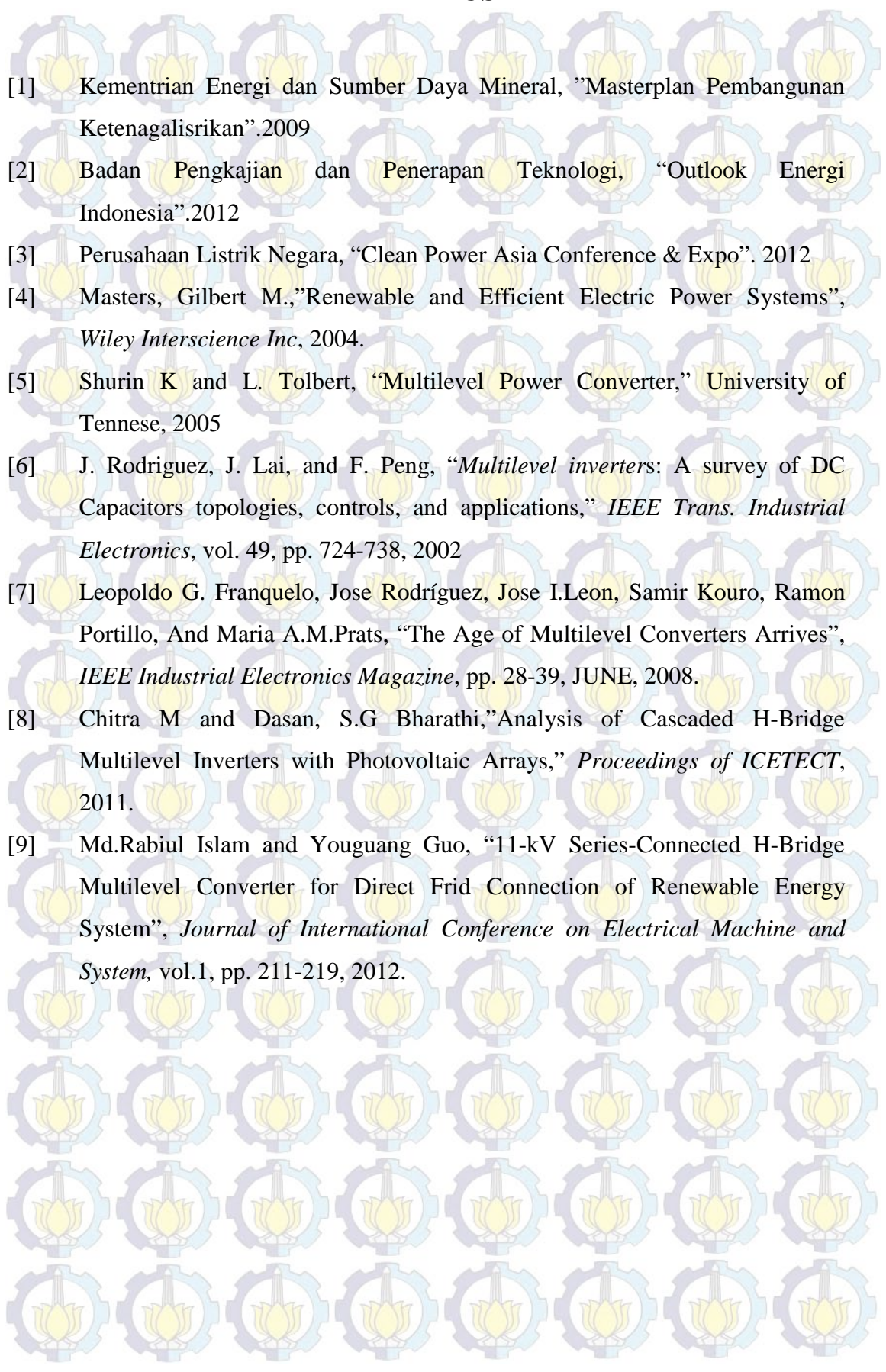
Saran yang dapat diberikan berdasarkan penelitian ini adalah:

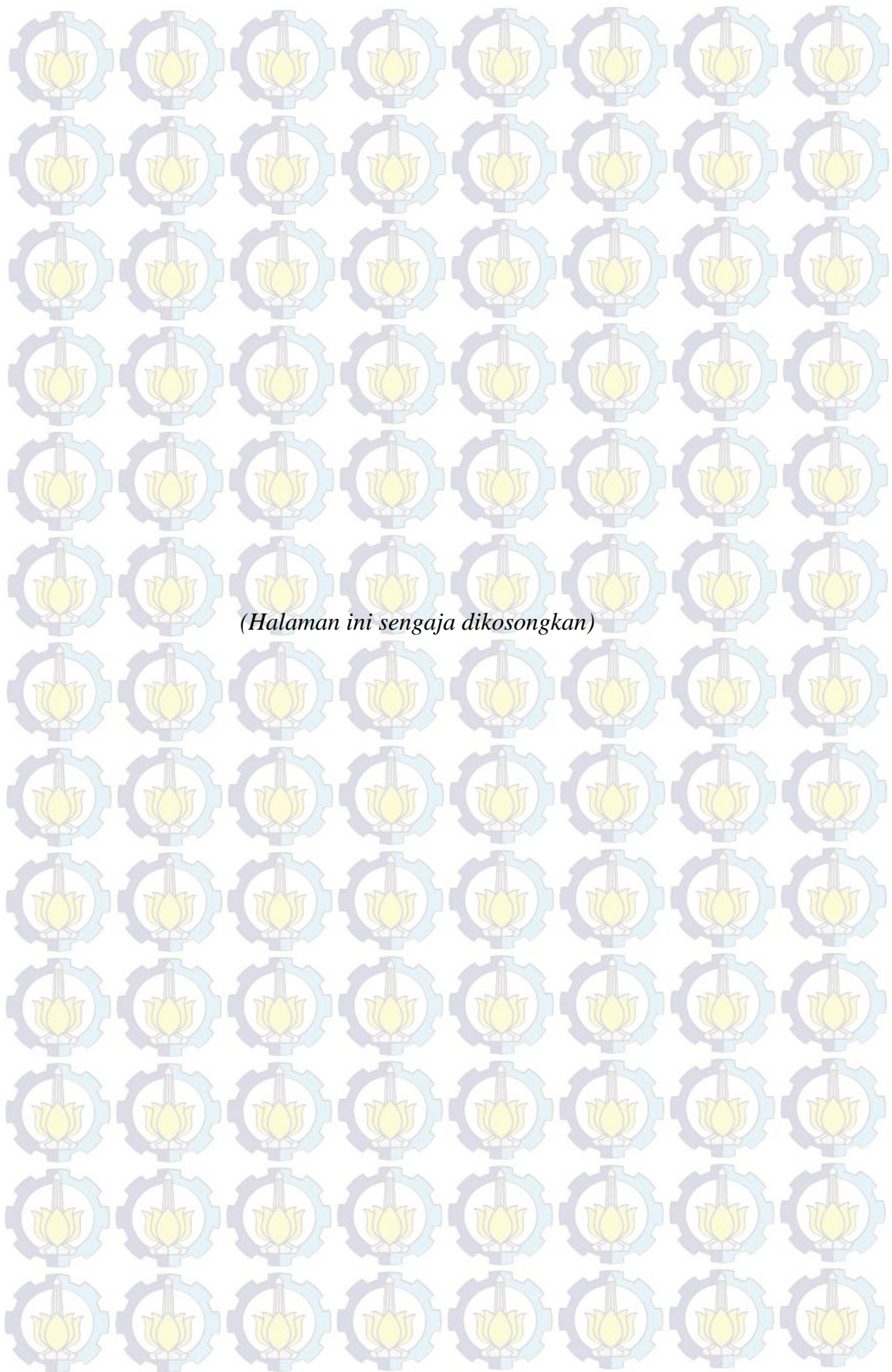
1. Pemilihan teknik switching CHB-MLI yang lebih tepat dan baik agar dapat meningkatkan efisiensi CHB-MLI .
2. Perlu dilakukan peningkatan kinerja rangkaian kontrol pada sisi *grid* agar diperoleh respon sistem yang lebih cepat.

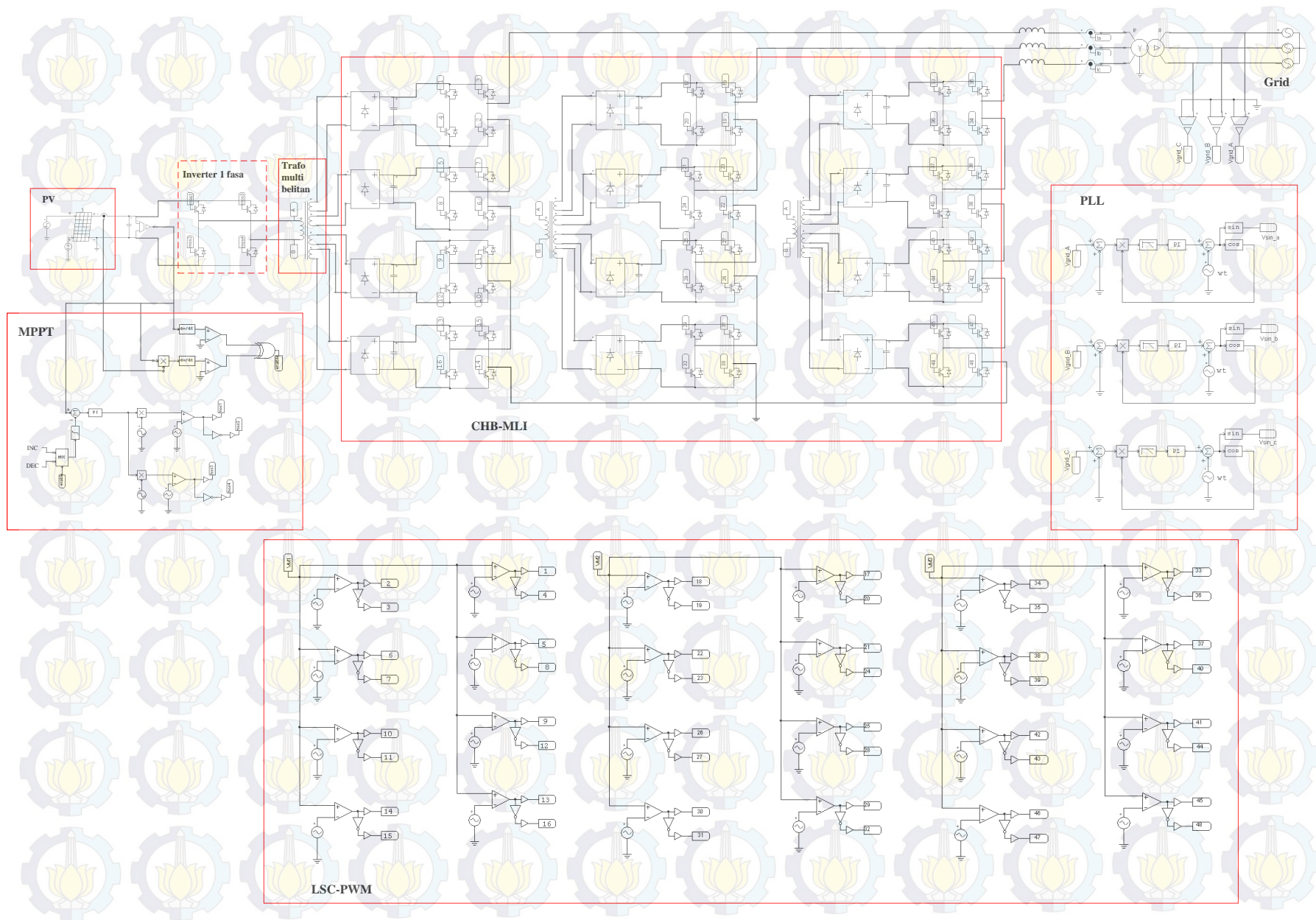


(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- 
- [1] Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, "Masterplan Pembangunan Ketenagalisrikan".2009
- [2] Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, "Outlook Energi Indonesia".2012
- [3] Perusahaan Listrik Negara, "Clean Power Asia Conference & Expo". 2012
- [4] Masters, Gilbert M., "Renewable and Efficient Electric Power Systems", *Wiley Interscience Inc*, 2004.
- [5] Shurin K and L. Tolbert, "Multilevel Power Converter," University of Tennese, 2005
- [6] J. Rodriguez, J. Lai, and F. Peng, "Multilevel inverters: A survey of DC Capacitors topologies, controls, and applications," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 49, pp. 724-738, 2002
- [7] Leopoldo G. Franquelo, Jose Rodríguez, Jose I.Leon, Samir Kouro, Ramon Portillo, And Maria A.M.Prats, "The Age of Multilevel Converters Arrives", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, pp. 28-39, JUNE, 2008.
- [8] Chitra M and Dasan, S.G Bharathi,"Analysis of Cascaded H-Bridge Multilevel Inverters with Photovoltaic Arrays," *Proceedings of ICETECT*, 2011.
- [9] Md.Rabiul Islam and Youguang Guo, "11-kV Series-Connected H-Bridge Multilevel Converter for Direct Frid Connection of Renewable Energy System", *Journal of International Conference on Electrical Machine and System*, vol.1, pp. 211-219, 2012.





BIOGRAFI PENULIS



Fifi Hesty Sholihah dilahirkan di Surabaya, 22 Juni 1990. Penulis adalah putri pertama dari tiga bersaudara. Penulis memulai jenjang pendidikannya di SD KH. Romly Tamim Surabaya, SMP Negeri 18 Surabaya, serta SMA Negeri 3 Surabaya hingga lulus tahun 2007. Penulis diterima sebagai mahasiswa D3 Teknik Elektro Industri, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya (PENS). Penulis kemudian melanjutkan studi lintas jalur D4 untuk jurusan yang sama di PENS. Pada tahun 2012 Penulis diterima sebagai mahasiswa program magister di program studi Teknik Sistem Tenaga dan berkonsentrasi pada bidang konversi energi pada Tugas Akhir dan Tesis. Penulis dapat dihubungi di alamat email *email.baru.fifi@gmail.com*.